HISTORIA
Religión y cálculo matemático

MEDICINA
Fármacos basados en ARN

ECOLOGÍA
¿Por qué proliferan las medusas?

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

InvestigacionyCiencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

MÁS CERCA DE UNA NUEVA FÍSICA

LA FÍSICA DE PARTÍCULAS ANTES Y DESPUÉS DEL HIGGS

SERIE ESPECIAL

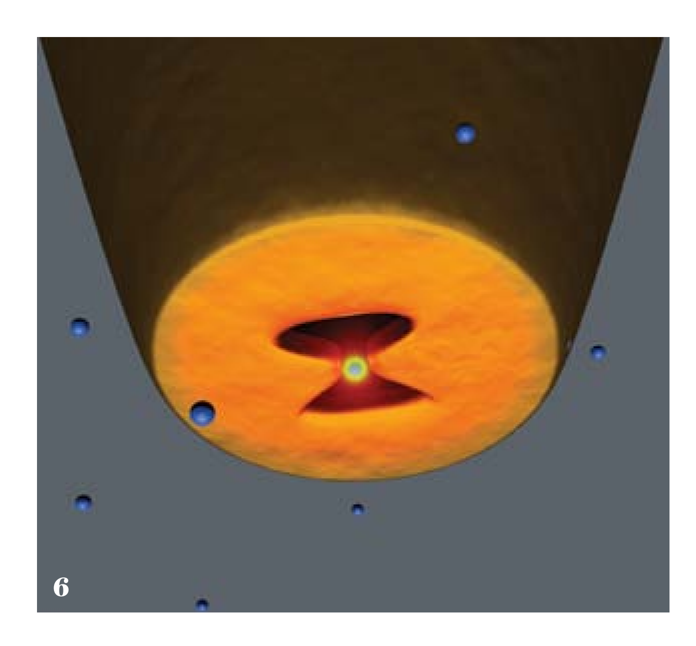


Junio 2014 6,50 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
SUPERSIMETRÍA Y CRISIS DE LA FÍSICA | PROLIFERACIÓN DE MEDUSAS | TERAPIAS CON ARN
N.º 453
JUNIO 2014

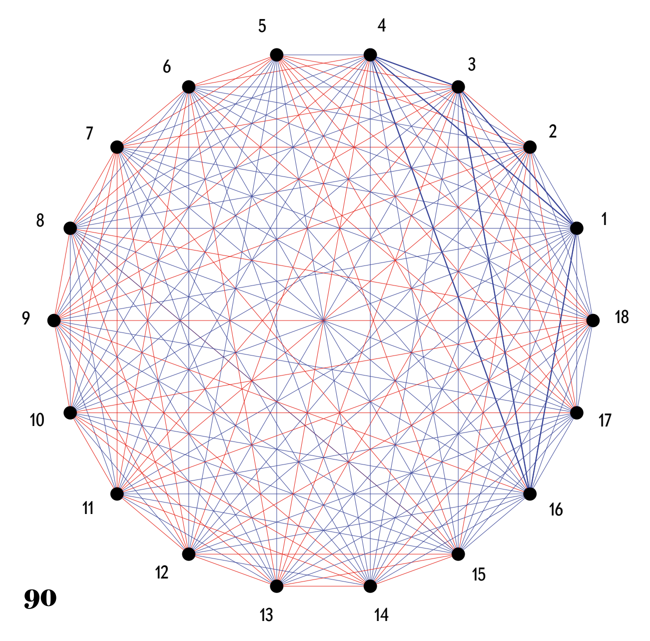


PLAMEN PETKOV (*fotografía*); KAREN EVANS (*diseño*)



6

8



90

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

El bosón de Higgs era la última pieza que faltaba para completar el modelo estándar de la física de partículas. Sin embargo, su hallazgo ha abierto la puerta a varias preguntas de primer orden. ¿Por qué su masa es tan pequeña? ¿No tendrían que haber aparecido ya las anheladas partículas supersimétricas? ¿Es estable el universo? A partir de este número, una serie de cuatro artículos analizará el porqué de estas y otras cuestiones, así como sus posibles respuestas.



redaccion@investigacionyciencia.es



Marzo 2014

ANTIGÜEDAD RUPESTRE

En el artículo «El nacimiento de la escritura en Egipto» [por Gwenola Graff; Investigación y Ciencia, marzo de 2014], la autora menciona que las pinturas rupestres más antiguas que se conocen se encuentran en la cueva de Chauvet, en el sudeste de Francia.

Sin embargo, en 2012 se hallaron en la cueva de Nerja (Málaga) restos orgánicos correspondientes a una pintura de focas, a los que se ha dado una antigüedad de 42.000 años. Estas podrían ser las pinturas rupestres más antiguas halladas hasta ahora.

Por otro lado, en junio del mismo año se publicó en la revista *Science* un estudio en el que, a partir de métodos de datación más precisos que el radiocarbono, un grupo internacional de arqueólogos dató una pintura de un disco rojo hallada en la cueva del Castillo (Cantabria) en 40.800 años; es decir, casi 6.000 años más antigua que las pinturas de la cueva de Chauvet.

Antonio Prieto Rodríguez
Salamanca

FABRICADO EN CHINA

En el artículo «China, refugio de las emisiones de España» [por Luis A. López, Guadalupe Arce y Jorge E. Zafrilla; Investigación y Ciencia, abril de 2014], los autores sostienen que el comercio entre China y España «resulta beneficioso para ambos países en términos económicos».

Se trata de una afirmación cuestionable. Al cabo de unos renglones, se explica que las multinacionales «han aprovechado las ventajas de costes de China (salariales y energéticos) para ubicar allí las fases de producción intensivas en mano de obra, como el ensamblaje». Esta acumulación de mano de obra en China lleva a un aumento del paro en países como España, lo que a su vez tiene consecuencias perjudiciales en otros aspectos de nuestra economía.

Los autores reducen el beneficio económico a los factores monetarios, sin tener en cuenta el aspecto humano. En mi opinión, España debería exigir a los países que producen bienes que posteriormente se venden aquí no solo una ficha técnica que garantice la calidad del producto, sino también una «ficha social» que certifique que no se explota a los trabajadores que los manufacturan. Además, así se evitaría la competencia entre los trabajadores españoles y los de aquellos países con una legislación laboral laxa.

Plácido Pérez Bru
Palma de Mallorca

Responden los autores: *Hoy en día pocos expertos ponen en duda la relación positiva que existe entre el libre comercio y el crecimiento económico. La teoría económica nos enseña que los distintos países pueden aprovecharse de sus «ventajas comparativas» para producir aquello que hacen mejor; por lo que, desde el punto de vista económico, se considera que el comercio internacional no es un juego de suma cero, sino que los agentes que comercian se benefician por ello. Esto se debe al hecho de que tanto empresas como ciudadanos pueden comprar y vender en otros mercados bienes y servicios con distintas características y más baratos.*

Detrás de esas ventajas económicas también las hay sociales. Es cierto que el crecimiento no beneficia a todos por igual, pero los estudios existentes en España no muestran la existencia de efectos negativos generalizados. De hecho, desde la entrada de China en la Organización Mundial del Comercio en 2001, las importaciones de China en nuestro país se multiplicaron por 3 hasta antes de la crisis de 2008 y, durante ese tiempo, se crearon en España más de 5 millones de puestos de trabajo. (La crisis, de la que China no es responsable, sí ha supuesto la destrucción de más de 3,5 millones de puestos de trabajo hasta 2014.) Y, en nuestra opinión, en aquellos casos en los que se identificasen efectos negativos vinculados al comercio, lo más adecuado sería articular políticas activas de formación de trabajadores, de fomento del tejido industrial, o ayudas sociales que permitiesen la adaptación al nuevo entorno.

En relación al segundo comentario del lector, es evidente que el crecimiento del comercio no ha venido acompañado de una mejora equivalente en el nivel de vida y en las condiciones laborales de todos los países implicados. Este hecho se hace más patente en los países en desarrollo, donde la creación de empleo se produce principalmente en el denominado «sector informal» de la economía. Según un estudio de la Organización Mundial de Comercio publicado en 2009, de dicho sector proceden los ingresos de alrededor del 60 por ciento de los trabajadores, en él existe una menor seguridad laboral, los ingresos son más bajos y no se facilita el acceso a las prestaciones sociales básicas.

Por tanto, no podemos estar más de acuerdo con la sugerencia de introducir una «ficha social» que acompañe al etiquetado de los productos. Nuestro artículo defiende lo mismo, pero aplicado al impacto ambiental. Este etiquetado tendría más éxito si las empresas lo utilizasen con estrategia de mercado, de modo que permitiese informar a sus consumidores sobre la sostenibilidad ambiental de toda la cadena de producción y que, al mismo tiempo, implicase que los suministradores de los países emergentes mantienen unas condiciones laborales justas.

Por último, nos gustaría agradecer al lector la posibilidad que nos ha brindado su comentario para explicar mejor algunas de las repercusiones de nuestro trabajo.

Erratum corrige

En el artículo «Terapia génica, segunda parte» [Investigación y Ciencia, mayo de 2014], al final del primer párrafo de la página 66 debe sustituirse «fármacos anticoagulantes» por «fármacos coagulantes».

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



MEDIOAMBIENTE

Árboles contaminantes

La próxima vez que camine a la sombra de un álamo o un roble en una calle concurrida, piénselo dos veces antes de inspirar hondo. A pesar de ser fuentes de oxígeno, estos árboles desprenden otros compuestos que reaccionan en el aire y generan ozono, un gas nocivo para los pulmones.

«Fue una gran sorpresa», explica Galina Churkina, del Instituto de Estudios Avanzados de Sostenibilidad de Potsdam, que investiga las emisiones del arbolado urbano. La predominancia de ciertos árboles en una calle puede elevar de forma notable las concentraciones de ozono, una molécula de oxígeno peculiar. La presencia de ozono a nivel del suelo está vinculada con el asma, la bronquitis y otras afecciones respiratorias.

A semejanza de los automóviles y las centrales eléctricas, los árboles emiten compuestos orgánicos volátiles (COV), un conjunto de sustancias que en presencia de la luz solar reaccionan con los óxidos de nitrógeno liberados por el humo del tráfico y forman ozono, uno de los componentes nocivos del esmog. Las chimeneas y los tubos de escape desprenden COV como subproducto de la quema de los combustibles fósiles; los árboles los emiten, entre otras razones, para repeler a los insectos dañinos y atraer a los polinizadores. Especies como el abedul, el tulipero y el tilo desprenden cantidades muy pequeñas de COV, pero otras como álamos, robles, sauces y tupelos emiten grandes cantidades, de modo que los valores de ozono pueden llegar a ser ocho veces mayores que los generados por los árboles de baja emisión.

Churkina y sus colaboradores no han identificado las ciudades que acogen un exceso de emisores de COV. Eso es tarea de los urbanistas. Como se necesita luz solar para crear ozono y la reacción resulta más intensa con temperaturas altas, las urbes frías y nubladas tienen menos motivos de preocupación que las cálidas y soleadas. Pero el cambio climático podría empeorar la situación.

¿Significa ello que las ciudades deben comenzar a talar los árboles que emiten más COV? Churkina lo desaconseja. Incluso los más contaminantes no deben despertar inquietud si están repartidos por las calles de la ciudad. Pero saber que un tilo es mejor que un álamo puede evitar problemas a las grandes zonas metropolitanas. Tal conocimiento resulta de interés en los proyectos del tipo «plantemos un millón de árboles», como medida para almacenar dióxido de carbono, mitigar el calor y retener el agua de las tormentas. En estas iniciativas, que están en auge, «queremos que se preste atención a las especies que se eligen», aclara Churkina. La investigadora se reunirá con las autoridades de Berlín este verano, y el municipio estadounidense de Boulder, en Colorado, está analizando la cuestión.

Por supuesto, existe otra solución. Si las emisiones del tráfico urbano se redujeran, los árboles dejarían de ser un problema para las ciudades.

—Mark Fischetti

TOM NAGY, GALLERY STOCK

FÍSICA NUCLEAR

Un hito en el largo y sinuoso camino hacia la fusión nuclear

El pasado mes de septiembre, bajo un bombardeo con rayos X, la rápida implosión de una cápsula de plástico sobre unos isótopos de hidrógeno congelados desencadenaba la fusión nuclear. Ocurrió en la Instalación Nacional de Ignición (NIF) del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore, Estados Unidos. No se trató de una reacción de fusión más: fue la primera creada en el NIF en la que el combustible liberó más energía que la absorbida.

Los 192 láseres del laboratorio inyectan energía desde 2010 a pequeñas pellas de combustible, de un par de milímetros de tamaño. En este caso se acertó con la coordinación temporal. En vez de ir aumentando la energía de los láseres a lo largo de la ráfaga, que dura veinte billonésimas de segundo, Omar Hurricane, físico del laboratorio de Livermore, y su equipo arrancaron con la intensidad máxima y dejaron que fuese disminuyendo. Procediendo de este modo, el combustible de la pella se calentó más deprisa, hasta unos cincuenta millones de grados, y sufrió presiones de 150.000 millones de atmósferas terrestres. Semejantes condiciones propician la fusión, y esta vez el combustible en que se produjo liberó casi el doble de energía que los alrededor de 10.000 julios que desencadenaron el proceso. Los resultados se publicaron en *Nature* en febrero.

«Nadie se había acercado tanto a la energía en que la fusión se mantiene por sí misma», dice Hurricane. Pero todavía queda mucho trabajo. Aunque la pella de combustible desprendió 17.000 julios de energía, en el experimento de fusión del NIF, tomado en su conjunto, las energías aplicada y liberada distaron de llegar a ser iguales. Se requirió más energía de la que se generó; solo alimentar los láseres exigió un brote de al menos 190 millones de julios. Ir más allá de generar tanta energía como la aportada (la «ignición», como lo llaman en el NIF) requerirá presiones aún más extremas, aparte de otras condiciones. Faltan décadas para que se consiga por esta vía una fuente de energía limpia y casi ilimitada.

—David Biello



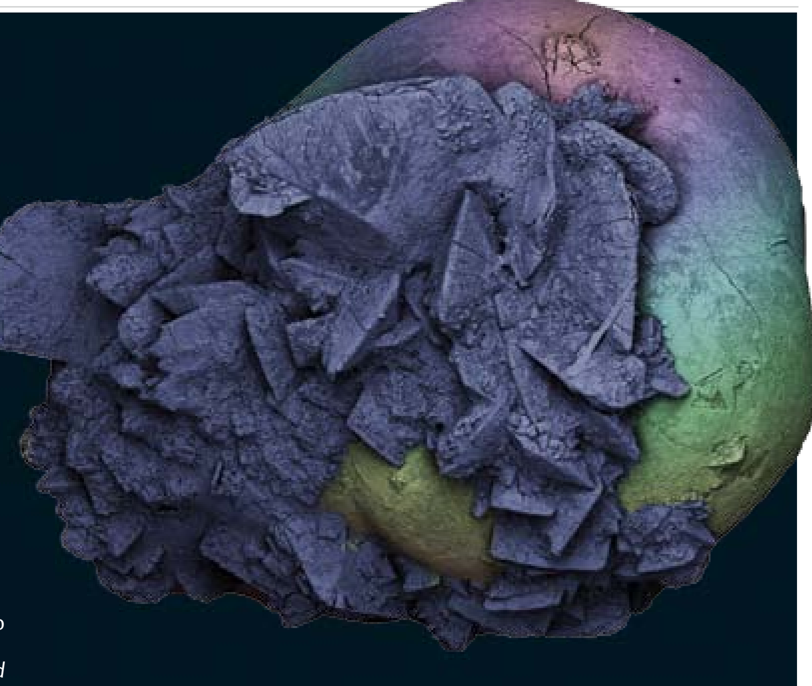
LOS PREAMPLIFICADORES aumentan la energía que se aplica para obtener la fusión.

¿QUÉ ES ESTO?

Cuando el riñón no depura adecuadamente las sales y los minerales, estos desechos se acumulan en pequeñas y dolorosísimas concreciones llamadas cálculos renales. Uno de cada once estadounidenses los padece, lo que supone el doble que hace veinte años, en parte como consecuencia de la epidemia de obesidad. Si alcanza el tamaño de una pepita de uva, el cálculo circula sin obstáculo por el uréter del afectado. Esta electromicrografía de barrido con colores falsos (aumentada 50 veces) retrata uno de ellos con espeluznante detalle, con los cristales lisos de oxalato de calcio monohidratado erizados de afilados cristales anhidros.

Pero no todos los cálculos se eliminan con facilidad: algunos crecen hasta obstruir la vía urinaria y obligan a intervenir. El método más habitual para acabar con el problema es la litotricia por ondas de choque, una técnica incruenta que dirige ondas de alta frecuencia contra el cálculo con la presión suficiente para desmenuzarlo y convertirlo en granos de arena. Esta primavera un equipo de urólogos, ingenieros y matemáticos de la Universidad Duke ha mejorado la técnica al descubrir que la talla de un pequeño surco en la lente que concentra las ondas de choque optimiza la forma de las ondas, lo que mejora la precisión y reduce el daño en los tejidos circundantes. Se trata de una innovación bastante asequible y sencilla que pronto demostrará su utilidad en el tratamiento de los millones de pacientes que en todo el mundo padecen cálculos renales.

—Annie Sneed



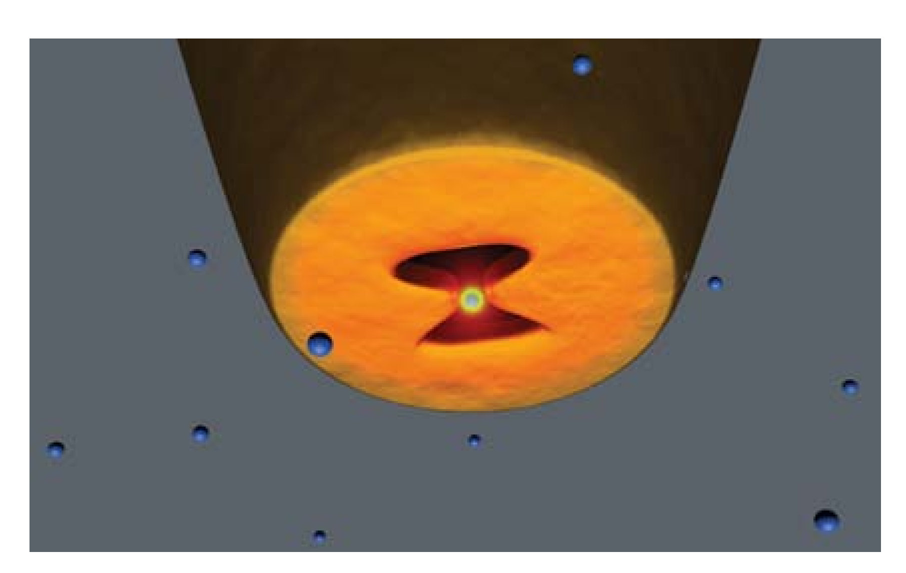
CORTESÍA DEL LABORATORIO NACIONAL LAWRENCE EN LIVERMORE *(experimento de fusión)*; KEVIN MACKENZIE, WELLCOME IMAGES *(cálculo renal)*

CIENCIA DE MATERIALES

Pinzas de partículas

En los años ochenta del siglo pasado, los Laboratorios Bell de AT&T (hoy Laboratorios Bell) crearon unas «pinzas ópticas», unos dispositivos que, aprovechando las leves fuerzas que la luz ejerce sobre la materia, manejan objetos del tamaño de una micra con haces de láser enfocados. A lo largo de los últimos treinta años ha habido avances, pero un problema ha seguido sin solventarse: como resultado de la ley de la difracción, que limita el enfoque de la luz, la mayoría de los objetos de menos de unos cien nanómetros escapa a las pinzas.

Pero la ley tiene un resquicio, según las investigaciones descritas hace poco en *Nature Nanotechnology*. La difracción afecta a la propagación de las ondas de la luz; sin embargo, en la escala nanométrica, los metales nobles como el oro convierten la luz en campos evanescentes, ondas no propagantes que se anulan a cortas distancias. Al aplicar este fenómeno a un cable óptico revestido de oro, un equipo de físicos del Instituto de Ciencias Fotónicas, en Castelldefels, lograron enfocar la luz en una escala tan reducida que permite manipular partículas de solo 50 nanómetros.



Antes podía trabajarse con partículas de ese tamaño adhiriéndolas a otras mayores, pero de esa forma se restringía el movimiento. Con la nueva herramienta se han prendido partículas solas, y así resulta posible moverlas con toda libertad en las tres dimensiones.

«Tenemos algo que podría convertirse en una herramienta universal, de interés no solo para los físicos, sino también para científicos de muchos campos diferentes», comenta Romain Quidant, investigador en fotónica. Entre las aplicaciones potenciales se cuentan la obtención de productos médicos elaborados con exactitud nanométrica, la fabricación de geometrías nanocristalinas para dispositivos electrónicos y la manipulación de moléculas sueltas (proteínas, por ejemplo).

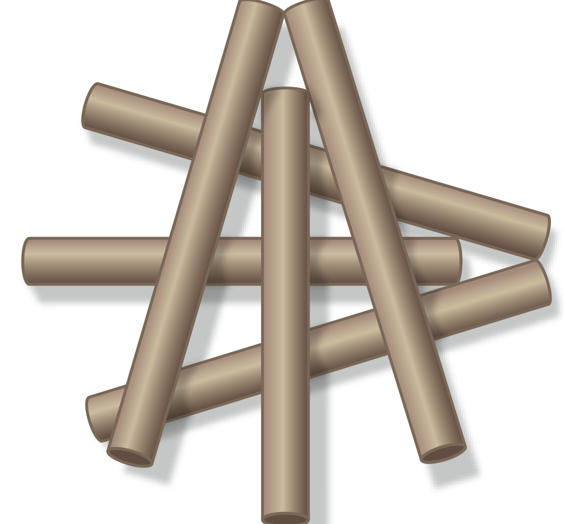
—Rachel Nuwer

MATEMÁTICAS

Encuentro de amigos de los problemas

«La línea que separa las matemáticas recreativas y las serias es borrosa», escribía Martin Gardner en el número de octubre de 1998 de *Investigación y Ciencia*. Gardner, que murió en 2010, fue el autor de la sección de juegos matemáticos de *Scientific American* durante un cuarto de siglo, hasta que se retiró en 1981 (sección que también se publicaba en *Investigación y Ciencia* desde su fundación en 1976). Sus admiradores se esfuerzan por mantener esa borrosidad; y bien recientemente, en marzo, lo han reiterado con el undécimo Gathering 4 Gardner, el congreso que se celebra cada dos años para recordar las contribuciones a las matemáticas y sus relaciones con el arte, la música, la arquitectura y, cómo no, el entretenimiento, de aquel hombre de múltiples saberes.

Gardner amaba las matemáticas recreativas. Los lectores asimilaban sus observaciones y las llevaban adelante por su cuenta, las mejoraban y generalizaban, para felicidad de Gardner. Así, en su sección dio una solución al viejo problema de disponer seis cigarrillos de modo que cada uno toque a los otros cinco (*derecha*). Los lectores vieron que también podía hacerse con siete, y en 2013 los matemáticos descubrieron que igualmente resultaba posible con siete cilindros circulares de longitud infinita.



Este año, los participantes en el congreso hablaron de al menos cincuenta problemas de ese estilo, rehuyendo la experiencia, conocida por tantos, de una enseñanza trillada de las matemáticas. La mayor parte de las 243 ponencias tenían que ver con el arte o la música: la belleza de la geometría estocástica; las visualizaciones holográficas; la relación de la música con los sólidos platónicos. Uno de los ponentes, el violonchelista Philip Shepard, disertó sobre la teoría de cuerdas (la teoría de los instrumentos de cuerda, en ese caso).

Y la magia, ni que decir tiene, hizo acto de presencia. Gardner, muy conocido también como creador de trucos de magia, no se atrevía a ejecutarlos en un escenario. Pero sí a abogar por el sobrecogimiento, la sorpresa y la maravilla en las matemáticas —esta fue una de las ideas repetidas en la reunión—; escribió varios ensayos sobre la capacidad de asombro como antídoto a la soberbia de la condición humana. Es una demostración de esa persistente capacidad que tantas personas inspiradas por Gardner se vean impelidas a buscarse las unas a las otras y a romperse la cabeza con los rompecabezas.

—Dana Richards

DE «THREE-DIMENSIONAL MANIPULATION WITH SCANNING NEAR-FIELD OPTICAL NANOTWEEZERS», POR J. BERTHELOT ET AL., EN *NATURE NANOTECHNOLOGY*, VOL. 9, ABRIL DE 2014 (*interpretación artística*); *SCIENTIFIC AMERICAN* (*cilindros*)

ZOOLOGÍA

Los primeros pasos en la vida de las tortugas

Las tortugas bobas recién nacidas aguardan al crepúsculo para salvar el corto trayecto que separa el nido arenoso del mar abierto. Unos diez años después regresan para pasar la adolescencia cerca de las playas donde nacieron. Durante decenios, esos años de juventud han permanecido envueltos en el misterio, por lo que algunos biólogos marinos se refieren a ellos como los «años oscuros».

El seguimiento de las diminutas tortugas ha tropezado con numerosos obstáculos. En su día se intentó colocarles radiotransmisores, pero el abultado volumen limitaba la libertad de movimiento de los quelonios. Con el tiempo, las dimensiones se han ido reduciendo, pero las baterías siguen resultando demasiado voluminosas. Entonces a Kate Mansfield, bióloga marina de la Universidad de Florida Central, se le ocurrió recurrir a la energía solar.

Sabía que otros estudiosos de la fauna estaban siguiendo los desplazamientos de las aves con la ayuda de pequeños paneles fotovoltaicos. Así que su grupo empleó transmisores equipados con un panel del tamaño de una caja de cerillas, con lo que logró reducir el peso del dispositivo hasta una escasa decena de gramos. También se las ingeniaron para sujetar los transmisores sin deformar el caparazón, gracias a una idea de la manicura de un miembro del equipo. Esta sugirió utilizar laca acrílica como capa base para añadir el adhesivo de silicona, que se estira a medida que la tortuga crece.

El grupo de Mansfield instaló radiotransmisores en 17 tortugas de tres a nueve meses de edad (la mayor medía 18 centímetros de largo) antes de liberarlas frente a la costa de Florida en aguas de la corriente del Golfo. Esta forma parte del giro del Atlántico norte, un sistema de corrientes que circula en sentido horario a lo largo de la costa oriental de Estados Unidos. Bryan Wallace, biólogo marino de Stratus Consulting y de la Universidad Duke, que no ha participado en la investigación, asegura que el estudio será recordado probablemente como un artículo fundamental en la biología de las tortugas marinas. Ha sido publicado en el número de abril de *Proceedings of the Royal Society B*.

«Según la hipótesis tradicional, esperábamos que las tortugas permaneciesen en las corrientes exteriores del giro para encaminarse hacia las Azores», archipiélago situado frente a la costa de Portugal, explica Mansfield. Pero a medida que los meses de seguimiento transcurrían, el itinerario seguido fue otro. Muchas se congregan en el centro del giro, donde se acumulan las algas marinas y en cuyo seno encuentran sustento y refugio.

Las tortugas también viajan más rápido de lo que se suponía, pues alcanzan las aguas de Carolina del Norte en tres semanas. A esa velocidad, llegan sin problemas a las islas Azores en menos de un año. Y aunque en ese plazo un objeto a la deriva también podría recorrer esa distancia, las tortugas se desvían en numerosas ocasiones de la ruta, lo que significa que poseen una velocidad de locomoción impresionante.

Otra observación sorprendente fue que los sensores de temperatura de los transmisores casi siempre señalaban varios grados por encima de la temperatura del agua. Ello indica que los tapices de algas mantienen abrigados a estos animales de sangre fría, una condición importante para el crecimiento.

—*Beth Skwarecki*

Azores

OCÉANO ATLÁNTICO

Florida

UNA TORTUGA (*línea amarilla*) conservó el transmisor durante más de siete meses.

FUENTE: «FIRST SATELLITE TRACKS OF NEONATE SEA TURTLES REDEFINE THE 'LOST YEARS' OCEANIC NICHE», POR KATHERINE L. MANSFIELD ET AL., EN *PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY B*, VOL. 281, N.º 1781, 22 DE ABRIL DE 2014 (*mapa*); LA MANDARINA DE NEWTON (*feria*)

AGENDA

CONFERENCIAS

10 de junio
Galaxias activas: Alimentando al monstruo
Montserrat Villar, Centro de Astrobiología-CSIC
Ciclo «Cita con las estrellas»
Sala Ámbito Cultural de El Corte Inglés
Málaga
www.astromalaga.es > Actividades

10 de junio
Tecnologías derivadas de la investigación en física de partículas
José Manuel Pérez, CIEMAT
Universidad de Valencia
ichep2014.es > Divulgación

OTROS

Del 4 al 20 de junio
Festival de Ciencia, Tecnología e Innovación
Barcelona
festivalcti.bcn.cat



10 de junio – Simposio
El quark cumple 50 años
Fundación Ramón Areces
Madrid
www.fundacionareces.es

Del 11 al 13 de junio
Simposio internacional de ciencias del mar
Auditorio Alfredo Kraus
Las Palmas de Gran Canaria
ivcongresoccm.ulpgc.es

12 de junio – Café científico
Mirando cristales con los ojos de un sincrotrón
Manel Sabés, Universidad Autónoma de Barcelona
Bar de ca l'Estruc
Sabadell
www.icp.cat > Actividades

Del 30 de junio al 2 de julio – Curso
Hablamos de ciencia: Teoría y práctica de la divulgación científica
Universidad Internacional de Andalucía
Centro Municipal de Formación
Málaga
cursosdeverano.unia.es

CONSERVACIÓN

El impacto del canal de Nicaragua

Los planes para construir un canal de 300 kilómetros de longitud entre el Pacífico y el Atlántico requieren una evaluación ambiental independiente

AXEL MEYER Y JORGE A. HUETE-PÉREZ

En junio del año pasado, el Gobierno de Nicaragua otorgó a una empresa de Hong Kong la concesión para construir un canal que conecte el océano Pacífico y el mar Caribe. La empresa HK Nicaragua Canal Development Investment (que opera como Grupo HKND) firmó una cesión para cincuenta años, ampliable a otros tantos. Espera iniciar las obras en diciembre, tras dedicar un año a decidir el trazado definitivo y realizar estudios de factibilidad. La concesión incluye el derecho a construir y operar polígonos industriales, aeropuertos, ferrocarriles y oleoductos, así como la expropiación de tierras y derechos sobre los recursos naturales existentes en la ruta del canal.

Según el Gobierno de Nicaragua, este proyecto de 40.000 millones de dólares estimulará el crecimiento económico del país, el segundo más pobre de América, del 4,5 por ciento en 2013 al 14,6 por ciento en 2016. Sin embargo, no se ha presentado ante la opinión pública ningún informe sobre la viabilidad económica y ambiental del proyecto. Nicaragua tampoco ha realizado ningún estudio independiente de impacto ambiental y lo fía todo a uno encargado por el Grupo HKND. La compañía no está obligada a hacer públicos los resultados.

En nuestra opinión, este canal podría generar una catástrofe ambiental que no se circunscribiría únicamente a Nicaragua. La excavación a lo largo de cientos de kilómetros de tierras y a través del lago de Nicaragua, la mayor fuente de agua potable de la región, destruirá unas 400.000 hectáreas de pluviselva y humedales.

Las obras paralelas a la construcción amenazarán a los ecosistemas adyacentes. A unos 240 kilómetros al norte del trazado más probable del canal se halla la Reserva de la Biosfera Bosawas: dos millones de hectáreas de selva tropical que sirven de refugio a numerosas especies amenazadas. A menos de 115 kilómetros al sur se halla la Reserva Biológica Indio Maíz, con más de 318.000 hectáreas de bosque seco tropical. Por si fuera poco, el recorrido más probable del canal atraviesa el sector septentrional de la Reserva Natural Cerro Silva.



EL LAGO DE NICARAGUA, la mayor reserva de agua potable de Centroamérica, alberga especies de enorme interés para la biología evolutiva.

CORTESÍA DE AXEL MEYER

El proyecto amenaza a diversas comunidades nativas, como los ramas, garifunas, mayangnas, misquitos y ulwas, así como a algunos de los ecosistemas marinos, terrestres y lacustres más frágiles, prístinos y de mayor relevancia científica de Centroamérica.

Los ciudadanos e investigadores nicaragüenses preocupados por el desarrollo del proyecto necesitan el apoyo de un número suficientemente elevado de conservacionistas, investigadores y sociólogos internacionales para reclamar dos cosas: en primer lugar, la evaluación independiente del impacto de semejante megaproyecto; y, en segundo lugar, que el Gobierno detenga el proyecto si la evaluación confirma los temores de que el canal producirá más pérdidas que beneficios para los recursos naturales, la población indígena y la biodiversidad de la región.

¿A qué precio?

Son muchos quienes han soñado con un canal a través de Nicaragua, desde los conquistadores españoles hasta Napoleón III. El industrial Cornelius Vanderbilt, los Estados Unidos de América y el Reino Unido también hicieron planes para construir uno a mediados del siglo xix, mucho antes de que finalizaran las obras del canal de Panamá, en 1914. Esos planes no prosperaron debido a las dificultades técnicas, al coste y, más recientemente, a la competencia con el canal de Panamá.

El trazado más probable del canal de HKND se extiende a lo largo de 286 kilómetros; en él se incluye un trecho de 90 kilómetros a través del lago de Nicaragua, lo que conllevaría una gran transformación del lecho del lago y de los cursos fluviales próximos. Para permitir la travesía de buques de hasta 400.000 toneladas, y competir así con el canal de Panamá ampliado (cuyas obras se ha previsto finalizar en 2015), el de Nicaragua debería alcanzar los 27,6 metros de profundidad y, de acuerdo con HKND, unos poco realistas 520 metros de ancho. Sin embargo, el lago de Nicaragua posee una profundidad me-

dia de tan solo 15 metros. Una operación de dragado de semejante calado implicará verter millones de toneladas de fango en otras partes del lago o en las tierras próximas. En cualquiera de los dos casos, el fango probablemente acabaría causando problemas de colmatación.

El lago de Nicaragua también serviría como depósito para el sistema de esclusas del canal. Ello requeriría la construcción de presas en un área con frecuentes movimientos sísmicos, lo que incrementaría el riesgo de desabastecimiento e inundaciones. El lago se vería afectado por la intrusión marina en la zona de compuertas, tal como sucede en las esclusas del canal de Panamá. De este modo, se transformaría un lago de agua dulce en un embalse de agua estancada aderezado con agua salada. Las menguantes poblaciones de peces eurihalinos, como el tiburón sarda, el pez sierra y el tarpón, todas ellas importantes para la pesca recreativa y el turismo, podrían verse amenazadas.

Debido a los contaminantes y a las obras de construcción, los cambios en la composición química del agua y la alteración de la concentración de oxígeno disuelto podrían amenazar a numerosas especies de peces dulceacuícolas y marinos que no existen en ninguna otra parte del mundo. El oleaje de las embarcaciones y el dragado podrían dañar y dejar sin vegetación las orillas de los ríos que conectarán los nuevos puertos en ambas costas con el interior. Sería el caso de los ríos Escondido, Rama y Oyate, en la costa caribeña, y Las Lajas y Brito en el lado pacífico.

La llegada de especies invasoras con el agua de lastre constituye otro motivo de preocupación. La introducción de peces exóticos podría tener efectos catastróficos, como ha demostrado el declive de las especies de cíclidos nativos del lago de Nicaragua desde la introducción de tilapias africanas en los años ochenta. Los cíclidos ocupan una posición destacada en la investigación sobre la evolución. Los estudios ecológicos y genéticos realizados durante cuatro décadas han producido decenas de publicaciones en las que han participado expertos de más de una docena de países. Uno de dichos estudios reveló que varias especies de cíclidos de la laguna Apoyo, situada en un cráter volcánico en las proximidades del lago Nicaragua, evolucionaron en menos de 10.000 años a partir de una única población.

REPERCUSIONES AMBIENTALES Y SOCIALES



Otros ecosistemas vulnerables situados en el corredor Cerro Silva-Indio Maíz-La Selva, como los humedales de San Miguelito y Bluefields, ambos habitados por numerosas especies, se verán afectados por el dragado, la colmatación, la llegada de especies invasoras, las emisiones de gases y otros contaminantes. La navegación y la construcción de puertos de gran calado en las costas del Atlántico y del Pacífico afectarán a las zonas de puesta de varias especies de tortugas y amenazarán a los arrecifes de coral y los manglares.

En tierra, las poblaciones animales se verán confinadas a los fragmentos de territorio resultantes de la construcción de las infraestructuras del canal y sus proyectos asociados. Como consecuencia, se alterarán los procesos migratorios, la conectividad y la dinámica ecológica. En la actualidad, las numerosas especies endémicas del Corredor Biológico Mesoamericano ya están sufriendo una rápida pérdida de hábitat. Este punto caliente de biodiversidad es un sistema de conservación establecido en 1997 por México y los países de Centroamérica para limitar la actividad humana y crear un corredor migratorio seguro entre Norteamérica y Sudamérica.

Las reservas de la biosfera nicaragüenses de Indio Maíz y Bosawas, eslabones clave del corredor, flanquean los posibles recorridos del canal. Cientos de miles de hectáreas de bosque y humedal serán transformadas y se destruirán el hábitat y las fuentes de alimento de especies ya amenazadas, como el tapir centroamericano (*Tapirus bairdii*), el mono araña (*Ateles geoffroyi*), el águila harpía (*Harpia harpyja*) y el jaguar (*Panthera onca*), un animal de importancia mística para las culturas de Mesoamérica.

Se espera que el reasentamiento de la población humana tenga un enorme coste social, económico, cultural y ambiental.

Cientos de pueblos serán evacuados, y sus habitantes indígenas, desplazados. Los yacimientos arqueológicos situados a lo largo del trazado también se hallan amenazados. Este trastorno puede volver a desencadenar la violencia civil que durante mucho tiempo azotó a la región. La situación ya es tensa, debido a la invasión de tierras ancestrales por parte de forasteros que llevan a pastar su ganado vacuno y talan ilegalmente el bosque.

¿Existe otro trazado del canal, el ferrocarril y el oleoducto proyectados que resulte factible económica, geográfica y políticamente y que reduzca de modo notable el riesgo? El consenso general en Nicaragua es que no. En cualquier caso, los pobladores de todas las especies vinculados desde antiguo a esta tierra perderán sus raíces.

Acción internacional

La concesión para la construcción de un canal interoceánico en Nicaragua constituye un ejemplo clásico de los retos que deben afrontar los países en desarrollo para equilibrar el crecimiento económico y la protección ambiental. Otras formas más sostenibles de incrementar los ingresos y generar empleo a partir del lago de Nicaragua podrían incluir la expansión del regadío, la acuicultura y el turismo. Se espera que la población del país aumente un 37 por ciento hasta 2050. Por lo tanto, se prevé que la escasez de agua y la presión sobre los recursos naturales se acentúen, lo que limitará las posibilidades de crecimiento sostenible y el bienestar general. Para hacer frente a un escenario de cambio climático, inseguridad alimentaria y pérdida de biodiversidad, Nicaragua debe establecer medidas de protección a largo plazo y no sacrificarse a sí misma ante los especuladores.

Una coalición de más de treinta asociaciones presentaron sus alegaciones al Gobierno de Nicaragua durante la segunda mitad del pasado año. Entre ellas se incluían las de tres comunidades (los indígenas misquitos y ulwas y el Gobierno regional de Rama-Kriol, en la región autónoma del Atlántico Sur), las cuales sostenían que la concesión del canal violaba sus derechos sobre la tierra y su autonomía legal. Estas alegaciones fueron desestimadas por la Asamblea Nacional en diciembre.

Urge una acción internacional rápida y decidida. La Academia de Ciencias de Nicaragua, presidida por uno de nosotros (J.A.H.-P.), está coordinando sus esfuerzos con la Red Interamericana de Academias de Ciencias para realizar una evaluación independiente. Necesitamos que más organizaciones conservacionistas y sociales nos aporten conocimientos y financiación para evitar la dramática destrucción de las comunidades indígenas, así como de la biodiversidad terrestre, marina y dulceacuícola y los recursos naturales de Centroamérica.

—Jorge A. Huete-Pérez
Centro de Biología Molecular, Universidad Centroamericana
Managua
—Axel Meyer
Universidad de Constanza
Baden-Württemberg

Artículo original publicado en *Nature*, n.º 506, págs. 287-289, 2014.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd.

PARA SABER MÁS

Gran Canal Interoceánico por Nicaragua: Perfil del proyecto. Comisión de Trabajo del Gran Canal, agosto de 2006. **go.nature.com/psvowd**

Prioridades de política e inversión para reducir la degradación ambiental de la cuenca del lago de Nicaragua (Cocibolca): los principales desafíos ambientales. I. I. Klytchnikova et al. Banco Mundial, 2013. **go.nature.com/91ruql**

FÍSICA

El estado actual de la búsqueda de materia oscura

La misteriosa sustancia invisible que impregna el universo confunde a los físicos. Varios resultados recientes generan controversia, a la par que cierto optimismo

ALEJANDRO IBARRA

Hace unos ochenta años, el astrónomo suizo Fritz Zwicky postuló la existencia de un nuevo tipo de materia para explicar las velocidades de las galaxias del cúmulo de Coma. A partir de la teoría de la gravitación de Newton, Zwicky calculó que la masa total de dicho cúmulo debía ser unas quinientas veces mayor que la masa de las galaxias que lo conformaban. Por tanto, argumentó, aquella agrupación de galaxias debía hallarse impregnada de un nuevo tipo de materia que, aunque invisible al ojo humano, daría cuenta de la masa que faltaba. Esa enigmática sustancia recibe hoy el nombre de «materia oscura».

Desde que Zwicky formulase su hipótesis, múltiples observaciones astrofísicas y cosmológicas han avalado la existencia de la materia oscura. Hoy sabemos que esta conforma en torno al 90 por ciento de la masa total de las galaxias y los cúmulos de galaxias. Si, además de la materia, consideramos también toda la energía presente en el universo, la fracción correspondiente a la materia oscura ascendería al 27 por ciento de todo lo que existe. Y, del mismo modo que la materia ordinaria se compone de cierta clase de partículas —protones, neutrones, etcétera—, también la materia oscura debería estar formada por uno o varios tipos de partículas (sean estas compuestas, como el protón, o elementales, como el electrón). Hasta la fecha, sin embargo, la naturaleza de dichos constituyentes continúa planteando todo tipo de preguntas.

En este tiempo se ha demostrado que la materia oscura no solo resulta invisible para el ojo humano, sino también para los instrumentos de rayos X, rayos gamma o microondas. En otras palabras: la materia oscura es realmente oscura, ya que parece interaccionar muy poco o nada con la radiación electromagnética. Sin embargo, la comunidad científica contempla con cierto optimismo la posibilidad de que, en un futuro no muy lejano, la nueva partícula

se muestre de un modo u otro en algún detector. No en vano, más de una veintena de experimentos actuales se dedican parcial o exclusivamente a su búsqueda. ¿Qué persiguen exactamente esos experimentos y a qué se debe tanto optimismo?

Uno de los grandes problemas a los que se enfrentan los físicos que investigan la materia oscura se debe a que no conocen a ciencia cierta las propiedades de la partícula que están buscando: se ignora su masa, su vida media, la intensidad con la que interacciona con la materia ordinaria... No obstante, existen buenas razones teóricas para pensar que la nueva partícula podría tener una masa entre 10 y 1000 veces mayor que la del protón. Por otro lado, la intensidad con la que interacciona con la materia ordinaria podría ser equiparable a la de la fuerza nuclear débil. A la vista de tales características, las partículas con esas propiedades han sido bautizadas con el nombre genérico de «partículas masivas que interaccionan débilmente», o WIMP, por sus siglas en inglés.

Debido sus interacciones con la materia ordinaria, las WIMP se habrían producido en copiosas cantidades durante los primeros instantes del universo. Si, además, su vida media fuese lo suficientemente larga (mayor que la edad actual del universo), hoy poblarían el cosmos en una proporción que, de acuerdo con múltiples cálculos teóricos, bastaría para dar cuenta de la cantidad observada de materia oscura. Esas notables propiedades convierten a las WIMP en las candidatas predilectas para explicar la materia oscura. Es más, las mismas interacciones débiles que habrían permitido su producción en el universo primitivo podrían constituir la clave para detectarlas hoy en un laboratorio.

Estrategias de búsqueda

En la actualidad se emplean tres métodos, todos ellos muy diferentes entre sí, para buscar materia oscura de tipo WIMP. Por un lado, si tales partículas interaccionan con los protones y los neutrones, al atravesar los detectores terrestres alguna de ellas debería chocar antes o después contra un núcleo atómico. Aunque eso ocurriría con muy poca frecuencia, el núcleo impactado generaría destellos de luz, iones o vibraciones (según el diseño del experimento), a partir de los cuales debería ser posible reconstruir el proceso e identificar las propiedades de la partícula incidente. Este método recibe el nombre de detección directa.

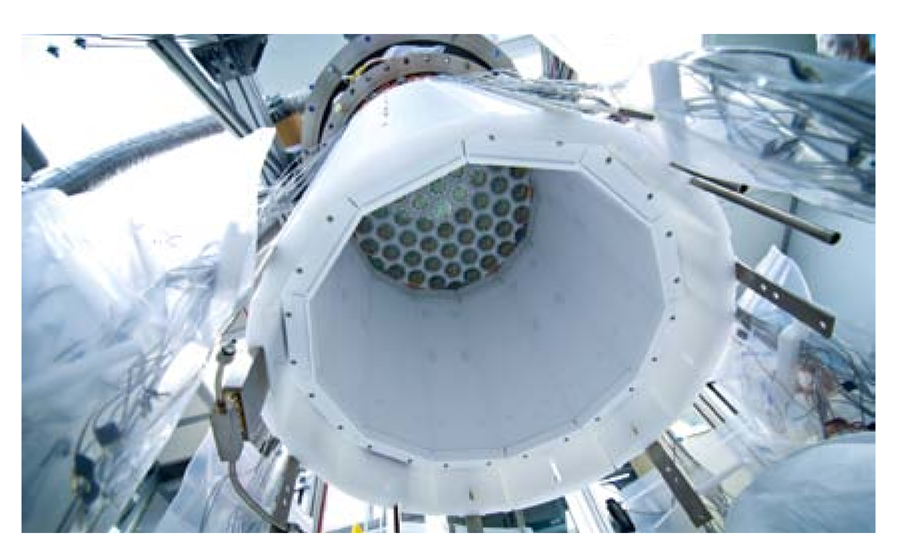
Aunque el principio de detección subyacente resulta muy sencillo de entender, los efectos provocados por la colisión entre una WIMP y un núcleo atómico podrían confundirse con los producidos por la radiactividad natural (como la emisión de rayos gamma, electrones y, sobre todo, neutrones). Pese a todo, gracias a la ayuda de ingeniosas y complejas técnicas, los experimentos actuales han conseguido suprimir esas señales espurias hasta lograr unas sensibilidades que parecían inalcanzables hace tan solo unos años.

La segunda estrategia de detección se apoya en la hipótesis de que, en ciertas regiones del universo, como el centro de las galaxias, la concentración de materia oscura debe de ser muy elevada. Por tanto, en tales zonas, la probabilidad de que dos WIMP colisionen será relativamente elevada. Como resultado de esos choques, se generaría una cascada de partículas energéticas (como positrones, antiprotones, rayos gamma o neutrinos) que, en principio, podrían observarse a distancia [*véase* «IceCube: Astrofísica desde el hielo», por Carlos Pérez de los Heros; Investigación y Ciencia, marzo de 2013].

Esta estrategia recibe el nombre de detección indirecta, ya que en ella las partículas de materia oscura no llegan hasta los aparatos terrestres, sino que se desintegran a grandes distancias de nuestro planeta. No obstante, ciertos procesos astrofísicos pueden generar la misma clase de partículas que las que se esperan de la desintegración de WIMP, por lo que han de diseñarse técnicas que permitan desentrañar una hipotética señal de materia oscura del «ruido de fondo» de origen astrofísico.

Por último, si las WIMP interaccionan con los protones, en las colisiones entre protones de muy alta energía, como las que lleva a cabo el LHC del CERN, deberían poder producirse partículas de materia oscura. Una vez creadas, estas atravesarían el detector sin dejar rastro y escaparían al espacio. Por tanto, esta estrategia no persigue medir señales directas de la existencia de WIMP, sino identificar colisiones protón-protón en las que el balance energético antes del choque no cuadre con el observado después; es decir, procesos en los que «desaparezca» energía. El método recibe el nombre de producción en aceleradores.

Durante la pasada década, se han logrado grandes avances técnicos en las tres estrategias de búsqueda. Y, quizá por primera vez, los físicos pueden soñar con que la detección de la elusiva partícula de materia oscura se encuentre a la vuelta de la esquina. Durante los últimos años se han publicado varios resultados que algunos miembros de la comunidad científica han interpretado como indicios de detección de WIMP. No obstante, dada la complejidad de los experimentos y el pequeño número de eventos observados, no pocos expertos han preferido mostrar cautela, a la espera de que laboratorios independientes confirmen las supuestas señales.



CORTESÍA DE CARLOS H. FAHAM, LAWRENCE BERKELEY/COLABORACIÓN LUX

¿LUZ EN LA OSCURIDAD? Desde las profundidades de una mina en Dakota del Sur, el experimento LUX intenta detectar las hipotéticas partículas de materia oscura a su paso por la Tierra. Con 370 kilogramos de xenón líquido (*la fotografía muestra el tanque aún vacío*), se trata del experimento de este tipo más sensible construido hasta la fecha. El año pasado anunció sus primeros resultados: ninguna señal de la anhelada partícula.

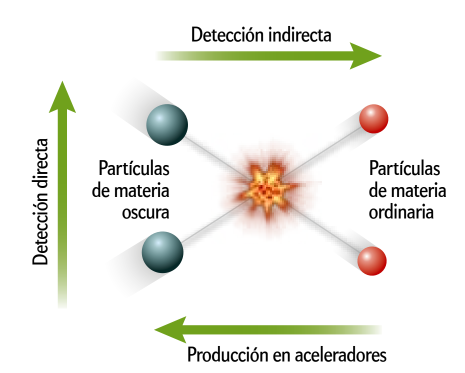
Resultados en conflicto

En el terreno de la detección directa, el experimento más sensible en la actualidad es LUX. Situado en una caverna a 1,5 kilómetros de profundidad, en la mina de Homestake, en Dakota del Sur, el detector consta de unos 370 kilogramos de xenón líquido. De ellos, 118 se destinan a la observación de materia oscura, mientras que el resto sirve como control para identificar señales espurias.

El proyecto LUX despertó grandes expectativas, pues algunos teóricos habían conjeturado que su sensibilidad bastaría para observar indicios de WIMP. No obstante, el 30 de octubre del año pasado, tras una primera campaña de 85 días, la colaboración anunció que no había detectado ninguna señal significativa. Los resultados de LUX confirmaban los obtenidos en 2011 y 2012 por el experimento XENON100, situado en las profundidades de la montaña del Gran Sasso, en Italia. Este último también utilizaba xenón líquido como medio detector.

En el pasado, sin embargo, cuatro experimentos competidores habían observado señales compatibles con la detección de WIMP. El primero de ellos fue DAMA, uno de los proyectos pioneros en detección directa, ubicado también en el laboratorio del Gran Sasso. Con un diseño que empleaba cristales de yoduro de sodio como medio detector, en 1998 esta colaboración publicó resultados que podían interpretarse como una señal de partículas de materia oscura. Diez años más tarde, una versión mejorada del experimento, DAMA/LIBRA, confirmó dicha señal.

Durante la última década se han obtenido indicios similares en otros tres experimentos: CoGeNT, ubicado en la mina de Soudan, en Minnesota, que emplea como detector un cristal de germanio; CDMS, en el mismo laboratorio, y que usa cristales de germanio y silicio (si bien la señal solo ha sido observada en el detector de silicio); y CRESST, en el Gran Sasso, que utiliza wolframato de calcio. Si bien todos ellos emplean materiales y técnicas de detección muy diferentes, sus conclusiones, al igual que las de DAMA, apuntan en una misma dirección: la detección de una partícula de materia oscura con una masa de unos diez gigaelectronvoltios (GeV); es decir, unas diez veces más pesada que el protón.



LAS ESPORÁDICAS interacciones entre la materia oscura y la materia ordinaria deberían dejar su impronta en el detector adecuado. Desde el espacio, los experimentos de detección indirecta buscan los productos generados en los choques de partículas de materia oscura. Los experimentos de detección directa, instalados en laboratorios subterráneos, intentan observar la eventual colisión de una partícula de materia oscura contra un núcleo atómico. Por último, también se considera la posibilidad de producir materia oscura a partir de los choques de partículas ordinarias que llevan a cabo los grandes aceleradores, como el LHC del CERN.

Aunque sin duda excitante, dicha interpretación no se encuentra exenta de controversia. De ser correcta, LUX tendría que haber detectado cientos de partículas de materia oscura donde no halló ninguna. Hoy en día existe un acalorado debate acerca de si los sucesos referidos por DAMA, CoGeNT, CDMS y CRESST corresponden a genuinas partículas de tipo WIMP o si, por el contrario, se trata de eventos espurios debidos a la radiactividad residual de los detectores.

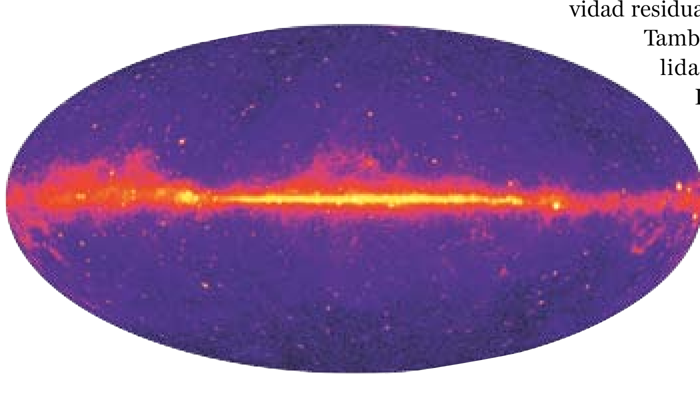
También se contempla la posibilidad de que los resultados de LUX y XENON100 no contradigan los del resto de los experimentos. Algunos físicos han propuesto que la materia oscura tal vez no interaccione con los núcleos de xenón, pero sí con los de otros elementos. Las futuras mediciones del experimento LUX, todavía operativo, así como las del experimento XENON1T, en fase de construcción, deberían ayudar a clarificar estas discrepancias a lo largo de esta década.

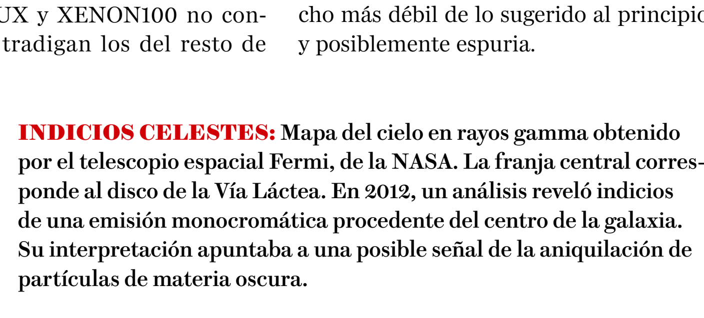
Señales desde el espacio

En los últimos dos años también se han obtenido nuevos resultados en el campo de la detección indirecta. Uno de los experimentos más relevantes ha sido el telescopio espacial de rayos gamma Fermi, de la NASA, que orbita a unos 550 kilómetros de altitud. En funcionamiento desde 2008, este instrumento barre cada tres horas la totalidad del cielo para medir el flujo cósmico de rayos gamma.

Aunque el telescopio Fermi fue diseñado para analizar los mecanismos astrofísicos de producción de rayos gamma, sus mediciones permiten, asimismo, buscar productos de posibles aniquilaciones de WIMP. Dado que los procesos astrofísicos que emiten rayos gamma son aún objeto de estudio, resulta difícil determinar si el flujo procedente de una dirección determinada posee o no una componente exótica. La excepción serían algunas señales muy distintivas, como las líneas monocromáticas de rayos gamma (emisiones concentradas en un intervalo de energías muy estrecho). Algunos modelos predicen que, al desintegrarse, las WIMP deberían generar señales de ese tipo.

En 2012, en un análisis de los datos del instrumento LAT (uno de los dos detectores a bordo de Fermi) realizado junto con Torsten Bringmann, Xiaoyuan Huang, Stefan Vogl y Christoph Weniger, identificamos una línea de rayos gamma de unos 130 GeV procedente del centro de la Vía Láctea. Aquel resultado provocó un gran revuelo, ya que podía interpretarse como debido a la aniquilación de partículas de tipo WIMP con una masa de 130 o 150 GeV, dependiendo del modelo teórico. Sin embargo, observaciones más recientes parecen indicar que dicha señal sería mucho más débil de lo sugerido al principio y posiblemente espuria.





INDICIOS CELESTES: Mapa del cielo en rayos gamma obtenido por el telescopio espacial Fermi, de la NASA. La franja central corresponde al disco de la Vía Láctea. En 2012, un análisis reveló indicios de una emisión monocromática procedente del centro de la galaxia. Su interpretación apuntaba a una posible señal de la aniquilación de partículas de materia oscura.

NASA/DEPARTAMENTO DE ENERGÍA DE EE.UU./COLABORACIÓN FERMI-LAT (*mapa del cielo*)

Otro experimento de gran relevancia en la búsqueda indirecta de materia oscura es el detector espacial AMS-02, de la NASA. Instalado en la Estación Espacial Internacional desde mayo de 2011, este detector no busca rayos gamma, sino partículas de materia y antimateria con carga eléctrica [*véase* «Un detector de partículas en el espacio», por Manuel Aguilar; Investigación y Ciencia, junio de 2011].

En abril de 2013, tras dos años de toma de datos, Samuel Ting, premio nóbel e investigador principal de la colaboración, anunció desde el CERN los primeros resultados de AMS-02 sobre la fracción observada de positrones (el flujo cósmico de positrones, dividido por el flujo total de electrones más positrones) para diferentes valores de la energía. Para energías mayores que unos 10 GeV, AMS-02 observó un incremento paulatino de dicha fracción. Sin embargo, los modelos astrofísicos más aceptados predicen que la cantidad de positrones debería disminuir con la energía.

Ese comportamiento anómalo ya había sido observado cinco años atrás por la colaboración PAMELA, un resultado que varios investigadores consideramos que tal vez pudiera atribuirse a aniquilaciones o desintegraciones de partículas de tipo WIMP. Sin embargo, semejante interpretación ha sido cuestionada recientemente por numerosos científicos, pues los modelos actuales del flujo cósmico de positrones no incluyen la contribución de fuentes astrofísicas. Por el momento, el origen de los excesos observados por PAMELA y AMS-02 continúa siendo una incógnita, si bien podrían deberse a la existencia de una partícula de tipo WIMP con una masa mayor de 350 GeV.

Durante los ochenta años transcurridos desde los trabajos de Zwicky, nuestra comprensión de la materia oscura ha experimentado grandes progresos. Sin embargo, es justo decir que aún no entendemos a ciencia cierta por qué el cúmulo de Coma no se desmiembra ni de qué se compone el 27 por ciento de la materia y la energía del universo.

Si, tal y como sugiere la hipótesis más aceptada, la materia oscura está constituida por partículas masivas que interaccionan débilmente, su verificación experimental podría llegar durante esta misma década. A pesar de todo, puede que las observaciones astronómicas encuentren su explicación en una partícula muy distinta —tal vez indetectable con los medios técnicos actuales— o incluso que admitan una causa más sencilla y natural que cualquiera de las propuestas hasta ahora.

Sea como fuere, se trata de uno de los mayores misterios que pesan sobre la física y la cosmología modernas. La búsqueda continúa.

—Alejandro Ibarra
Departamento de física
Universidad Técnica de Múnich

PARA SABER MÁS

Fermi LAT search for internal bremsstrahlung signatures from dark matter annihilation. T. Bringmann, X. Huang, A. Ibarra et al. en *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, vol. 12, n.º 7, pág. 54, julio de 2012. Disponible en **arxiv.org/abs/arXiv:1203.1312**

First results from the LUX dark matter experiment at the Sanford Underground Research Facility. Colaboración LUX en *Physical Review Letters*, vol. 112, 091303, 4 de marzo de 2014. Disponible en **arxiv.org/abs/arXiv:1310.8214**

EN NUESTRO ARCHIVO

Mundos oscuros. J. Feng y M. Trodden en *IyC*, enero de 2011.

ECOLOGÍA

Las zonas áridas, cada vez menos fértiles

Un estudio revela que la escasez de agua altera el balance de carbono, nitrógeno y fósforo en los ecosistemas áridos y prevé las repercusiones del cambio climático en estas zonas

DAVID A. WARDLE

En todos los ecosistemas terrestres, los ciclos de los elementos químicos están accionados por procesos tanto bióticos como abióticos. Pero la manera en que estos influyen sobre los ciclos varía según el elemento de que se trate. Ello se debe, en parte, a que las entradas de carbono y nitrógeno en los ecosistemas son promovidas sobre todo por mecanismos biológicos (fotosíntesis, fijación de nitrógeno), mientras que las de fósforo dependen principalmente de la meteorización de las rocas. Los cambios ambientales pueden alterar estos mecanismos y provocar un desacoplamiento de los ciclos. Así lo han demostrado los estudios de cronosecuencias (gradientes de suelos de diferente edad), en los que se ha visto que la disponibilidad de fósforo en relación al nitrógeno se reduce a lo largo del tiempo. Manuel Delgado-Baquerizo, entonces en la Universidad Pablo de Olavide, en Sevilla, y sus colaboradores aportaron en fecha reciente pruebas de una alteración similar a causa de la creciente sequedad de los ecosistemas áridos de todo el mundo.

Los autores analizaron muestras de suelos obtenidas en 224 parcelas de estos ecosistemas, que variaban en su grado de aridez y pertenecían a todos los continentes, excepto la Antártida. Observaron que, al incrementar la aridez, disminuía la cantidad total de carbono y nitrógeno, así como las formas asimilables de estos elementos, mientras que el fósforo biodisponible aumentaba. Seguramente, la reducción de carbono y nitrógeno se produce porque la escasez de agua dificulta los procesos biológicos que accionan las entradas y flujos de estos elementos en el ecosistema; en cambio, el aumento del fósforo disponible es consecuencia de una mayor meteorización de las rocas que contienen fósforo y de la menor absorción de este nutriente por las plantas.

Estos resultados revelan que, dado que la respuesta del fósforo edáfico a la aridez creciente está desacoplada de la del carbono y el nitrógeno, las relaciones entre carbono y fósforo y entre nitrógeno y fósforo están incrementando de forma notable. Mediante la modelización de ecuaciones estructurales (un método estadístico que

permite estimar los mecanismos causales), los autores demuestran también que la aridez ejerce un efecto negativo sobre el contenido de materia orgánica del suelo y la actividad de la enzima fosfatasa (un indicador de la demanda biológica de fósforo), pero un efecto positivo sobre el fósforo total y el inorgánico. Todos estos datos indican que, conforme aumenta la aridez, el crecimiento de las plantas y de otros organismos se ve más limitado por el nitrógeno, pero menos por el fósforo.

Hay un paralelismo claro entre estos hallazgos y los obtenidos en investigaciones previas que examinaron el desarrollo de un ecosistema sobre superficies terrestres recién formadas (sucesión primaria). Mediante el estudio de cronosecuencias, se ha demostrado que las superficies nuevas presentan una elevada disponibilidad de fósforo en relación al nitrógeno; pero, con el tiempo, al intensificarse los procesos biológicos, se va acumulando materia orgánica en el suelo y el fósforo se va volviendo limitante con respecto al nitrógeno. En otras palabras, los cambios que tienen lugar con una aridez creciente operan en gran medida en una dirección opuesta a los que se dan durante la sucesión ecológica. Por ello, sería interesante evaluar si las variaciones en la proporción entre nitrógeno y fósforo relacionadas con la escasez de agua repercuten sobre las características de la vegetación, los procesos ecosistémicos y la biota (tanto la situada sobre el suelo como la subterránea), tal como se ha demostrado en estudios previos de sucesión.

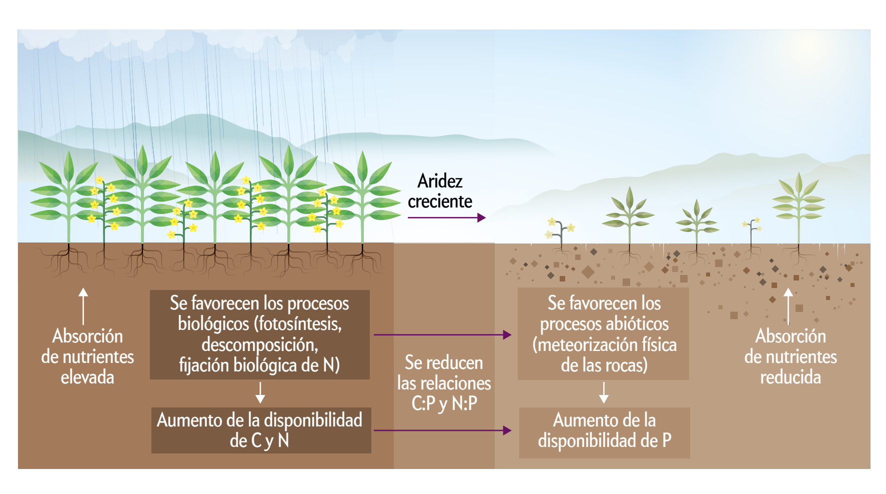
El descubrimiento de que la aridez da lugar a una mayor disponibilidad de fósforo con respecto al nitrógeno puede parecer paradójico a primera vista. En especial, si se tiene en cuenta que algunas de las regiones más secas del mundo, como gran parte de Australia, figuran también entre las más pobres en este nutriente. La limitación de fósforo resulta sobre todo aparente en suelos muy antiguos (incluidos los de regiones áridas), en los que el elemento se ha perdido a lo largo de un período prolongado y no puede volver a recuperarse. Puede que en las tierras áridas, como en todos los ecosistemas, la disponibilidad del fósforo en relación al nitrógeno dependa de múltiples factores: la edad del suelo la reduce y, tal como ha demostrado Delgado-Baquerizo, la aridez la aumenta. Aunque algunos datos indican que las pautas de precipitación influyen en la evolución de los balances de nutrientes con la edad del suelo, todavía no se ha comprobado hasta qué punto la relación entre nitrógeno y fósforo es determinada por la edad del suelo y no por la aridez, o por la interacción de ambos factores.

Los hallazgos de Delgado-Baquerizo y sus colaboradores ofrecen una nueva visión sobre las consecuencias del aumento previsto de la aridez a causa del cambio climático. En concreto, revelan que en las zonas áridas de todo el mundo el balance entre carbono, nitrógeno y fósforo se alterará cada vez más a medida que los ecosistemas se tornen más secos. Ello se deberá a las pérdidas generalizadas de materia orgánica edáfica (que conllevará una disminución del carbono y nitrógeno biológicamente disponibles) y a la influencia cada vez mayor de los factores abióticos (con lo que aumentará el fósforo disponible). Despiertan especial preocupación los datos que demuestran que el desacoplamiento en los ciclos elementales se acelera al acentuarse la aridez. Tal observación sugiere que, a medida que el cambio climático avance, las propiedades ecosistémicas de muchas tierras áridas podrían sobrepasar un punto de inflexión del que sería difícil o imposible retornar.

El estudio destaca que la aridez tendrá repercusiones ecológicas adversas, no solo por el efecto directo de la escasez de agua, sino por el efecto indirecto del desacoplamiento de los ciclos biogeoquímicos y la reducción de materia orgánica edáfica. Las consecuencias podrían ser de gran alcance. Así, los ecosistemas áridos, al acumular menos carbono en la vegetación y en el suelo, poseerán una menor capacidad de mitigar el aumento del dióxido de carbono atmosférico y el cambio climático. De forma más inmediata, la reducción de carbono y nitrógeno edáficos puede menguar la cantidad de nutrientes disponibles para las plantas y, por consiguiente, la productividad de los cultivos y el ganado. Ello tendrá repercusiones calamitosas para muchas de las más de 2000 millones de personas que viven en regiones áridas. El estudio subraya que la escasez de agua asociada al cambio global, y sus efectos sobre los balances de nutrientes del suelo, puede restringir en gran medida los servicios ecosistémicos que proporcionan las tierras áridas y de los que depende el bienestar humano.

—David A. Wardle
Dpto. de ecología y gestión forestal
Universidad Sueca de Ciencias Agrícolas
Umeå

Artículo original publicado en *Nature*, n.º 502, págs. 628-629, 2013. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2013



EN LOS ECOSISTEMAS ÁRIDOS, la escasez de agua provoca un desacoplamiento en los ciclos de varios elementos. A medida que aumenta la aridez, se reduce la cantidad de carbono (C) y nitrógeno (N) disponibles en el suelo, mientras que la de fósforo (P) aumenta. Ello se debe a la alteración de los procesos biológicos que reducen los valores de C y N, así como a la intensificación de los procesos abióticos que mejoran la disponibilidad de P.

PARA SABER MÁS

Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands. M. Delgado-Baquerizo et al. en *Nature* vol. 502, págs. 672-676, octubre de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Espartales ibéricos. F. T. Maestre en *IyC*, septiembre de 2008.
La Gran Muralla Verde. R. Bally y R. Duponnois, en *IyC*, junio de 2014.
La desertificación en el sudeste ibérico. Juan Albaladejo Montoro en *IyC*, junio de 2014.

ALTAS ENERGÍAS

La supersimetría y la crisis de la física

Durante décadas, los físicos han explorado una bella teoría que prometía una comprensión más profunda del mundo cuántico. Ahora se encuentran en una encrucijada: si los primeros indicios empíricos no aparecen el año próximo, deberán afrontar un cambio de paradigma histórico

Joseph Lykken y Maria Spiropulu

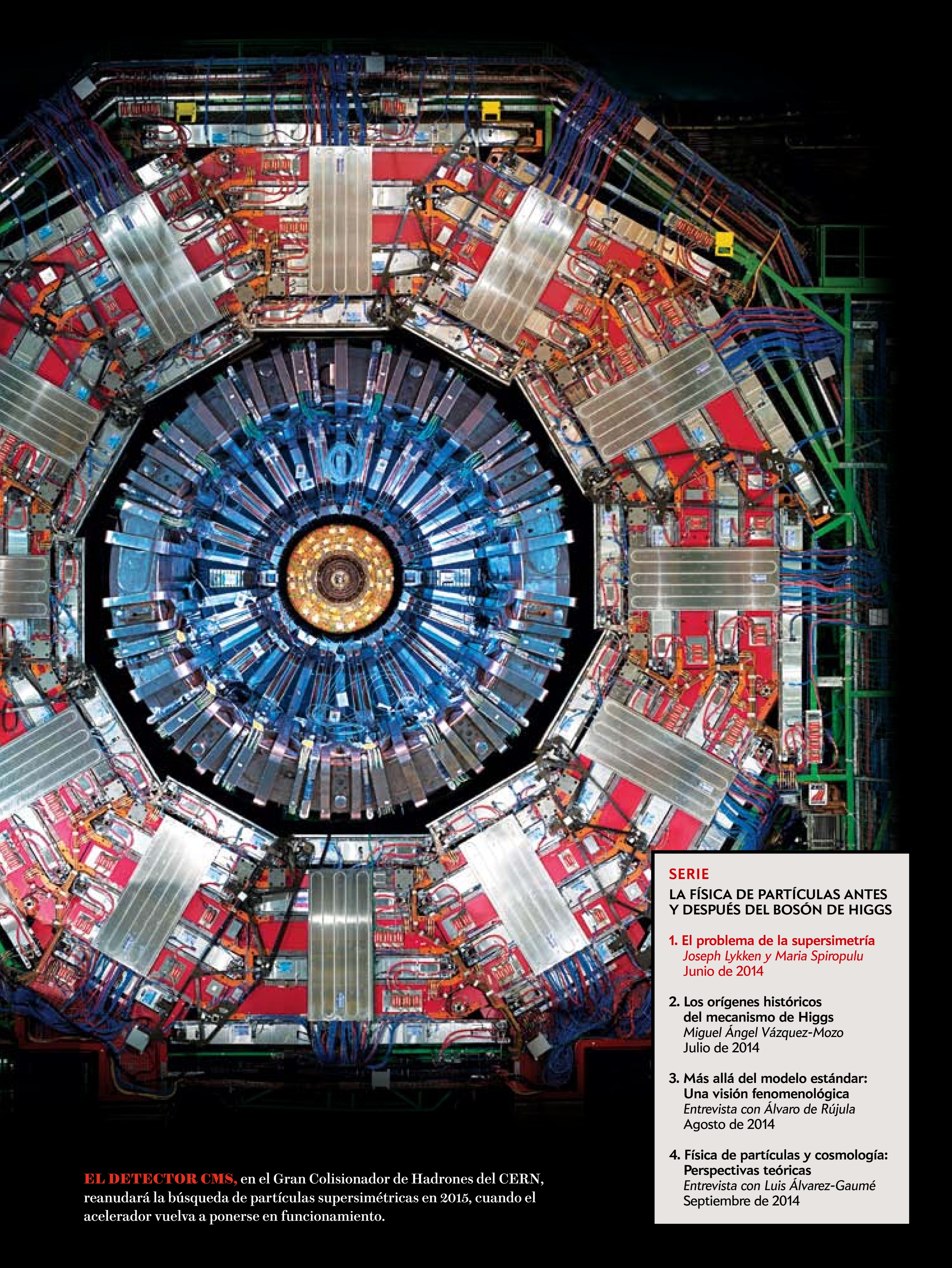


EN SÍNTESIS

La supersimetría postula que a cada clase de partícula conocida le corresponde una *supercompañera* hasta ahora no detectada. Su atractivo reside en que podría resolver de un plumazo varios problemas en física teórica.

Numerosos físicos confiaban en que las primeras señales empíricas de supersimetría aparecerían en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN. Si eso no sucede pronto, la teoría se verá en problemas.

El hecho de que las partículas supersimétricas continúen sin aparecer ha llevado a algunos investigadores a poner en cuestión ciertas hipótesis que venían asumiendo desde hacía décadas.



EL DETECTOR CMS, en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, reanudará la búsqueda de partículas supersimétricas en 2015, cuando el acelerador vuelva a ponerse en funcionamiento.

SERIE

LA FÍSICA DE PARTÍCULAS ANTES Y DESPUÉS DEL BOSÓN DE HIGGS

1. **El problema de la supersimetría**
   Joseph Lykken y Maria Spiropulu
   Junio de 2014

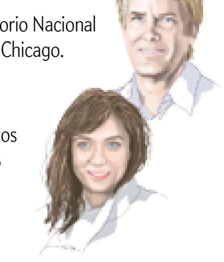
2. **Los orígenes históricos del mecanismo de Higgs**
   Miguel Ángel Vázquez-Mozo
   Julio de 2014

3. **Más allá del modelo estándar: Una visión fenomenológica**
   Entrevista con Álvaro de Rújula
   Agosto de 2014

4. **Física de partículas y cosmología: Perspectivas teóricas**
   Entrevista con Luis Álvarez-Gaumé
   Septiembre de 2014

Joseph Lykken es físico teórico del Laboratorio Nacional de Aceleradores Fermi (Fermilab), cerca de Chicago.

Maria Spiropulu es física experimental de partículas en el Instituto de Tecnología de California. Busca indicios de supersimetría entre los datos del experimento CMS del Gran Colisionador de Hadrones del CERN; antes lo hizo en el acelerador Tevatrón, del Fermilab.



Al amanecer de un día de verano de 2012, ya íbamos por la tercera ronda de café cuando iniciamos la conexión por vídeo entre nuestra oficina, en el Instituto de Tecnología de California, y el CERN, en Ginebra. En el monitor aparecieron nuestros compañeros del equipo Razor, uno de los múltiples grupos dedicados a analizar los datos del experimento CMS del Gran Colisionador de Hadrones (LHC). Razor fue creado con el objetivo de buscar señales de supersimetría, una teoría propuesta hace 45 años para reemplazar los modelos convencionales de física de partículas, resolver algunos de sus profundos problemas conceptuales y explicar la naturaleza de la materia oscura. Tras largas décadas de búsqueda, sin embargo, los indicios experimentales de la supersimetría siguen sin aparecer.

Desde el CERN, el líder de Razor, Maurizio Pierini, proyectó un gráfico con los últimos datos. A nueve husos horarios de distancia, pudimos ver entrecejos fruncidos en toda la sala: había una anomalía. «Alguien debería echar un vistazo a este evento», sugirió Pierini. El «evento» era uno de los billones de choques entre protones producidos en el LHC. En pocos minutos, los autores de este artículo descargamos el registro completo de la colisión en un portátil.

La supersimetría constituye una bellísima solución a algunos de los grandes problemas que, desde hace más de cuatro décadas, hostigan a los físicos teóricos. Proporciona una serie de respuestas a importantes porqués: ¿por qué las partículas elementales tienen las masas que tienen?, ¿por qué las interacciones fundamentales presentan las intensidades que presentan? En suma, ¿por qué el universo es como es? La supersimetría predice, además, que el universo debería estar lleno de cierta clase de partículas hasta ahora no detectadas, «compañeras supersimétricas» de las partículas habituales, las cuales podrían resolver el misterio de la materia oscura. No resulta exagerado afirmar que la mayoría de los físicos de partículas cree que la supersimetría *debe* ser cierta: hasta tal punto resulta convincente. Por ello, muchos investigadores esperaban que el LHC proporcionase los primeros indicios experimentales de su validez.

Al examinar aquella colisión vimos lo que parecía ser una prueba irrefutable: dos grupos de partículas muy energéticas parecían huir de algo invisible. ¿Una partícula supersimétrica, quizá? Poco después vimos un pico rojo en la representación de los datos. ¿Se trataría de una señal espuria debida a un fallo del detector? Así fue. Al final, todo quedó en una decepción más en la larga búsqueda de supersimetría.

Los datos obtenidos durante la primera fase de experimentos del LHC han descartado buena parte de las encarnaciones más estudiadas de la supersimetría. Eso ha comenzado a provocar, si no una crisis, sí un pánico generalizado entre los físicos de partículas. El LHC reanudará sus experimentos a principios de 2015, año en que comenzará a operar a la máxima energía para la que fue diseñado. Los nuevos datos permitirán que los experimentos ATLAS y CMS descubran —o descarten— partículas supersimétricas aún más masivas. Pero, si al final de la segunda fase no aparece nada nuevo, la física fundamental se hallará en una encrucijada: ante la falta de indicios que muestren que la naturaleza juega según nuestras reglas, o bien habrá que abandonar el trabajo de toda una generación, o bien insistir y esperar que, algún día, otro colisionador más energético demuestre que siempre habíamos tenido razón.

La historia de la ciencia se halla repleta de largas travesías que han concluido de manera triunfal; un buen ejemplo lo hallamos en el descubrimiento del bosón de Higgs. Ahora, sin embargo, los físicos de partículas se muerden las uñas a la espera de que los datos del LHC pongan a prueba la grandiosa catedral teórica que han estado erigiendo durante el último medio siglo.

LA NECESIDAD DE SUPERSIMETRÍA

La supersimetría forma parte de un intento más amplio de entender los misterios del mundo cuántico. Hoy por hoy, contamos con una teoría del mundo subatómico tremendamente satisfactoria y predictiva, conocida con el prosaico nombre de «modelo estándar». Este combina la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad especial en un esquema que da cuenta de todas las partículas y las interacciones fundamentales de la naturaleza (salvo la gravedad). La materia queda descrita por cierto tipo de partículas, denominadas fermiones (en honor a Enrico Fermi). Estas interaccionan entre sí mediante tres fuerzas, asociadas a otra clase de cuantos, llamados bosones (por Satyendra Bose).

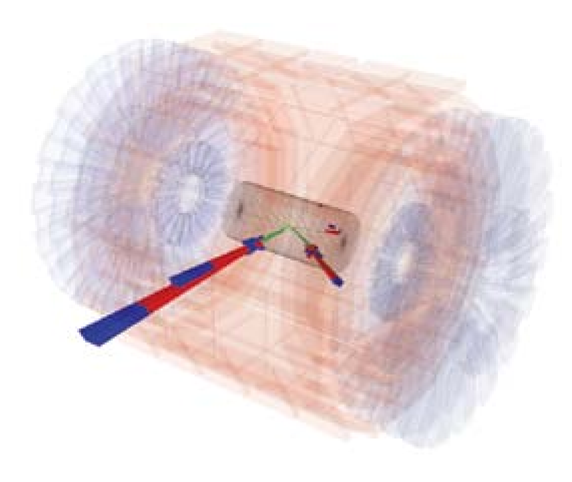
Aunque el modelo estándar describe de manera excelente el mundo subatómico, las dificultades aparecen cuando nos preguntamos acerca del porqué de sus características. Por ejemplo, nos dicta que existen tres tipos de leptones (una clase de fermiones): el electrón, el muon y el tauón. Pero ¿por qué tres, y no dos, cuatro o quince? La teoría no proporciona ninguna pista al respecto; para hallarla, debemos explorar la realidad a niveles más profundos. Tampoco explica por qué las partículas tienen la masa que tienen. ¿Por qué el electrón es mucho más ligero que el bosón de Higgs? De nuevo, el modelo estándar calla.

Los físicos teóricos dedican buena parte de su tiempo a pensar en tales cuestiones. A tal fin, construyen modelos que intentan explicar el modelo estándar. La teoría de cuerdas constituye un esfuerzo por descender a un nivel más profundo en nuestra comprensión de la realidad, pero existen otros.

Sin embargo, todas esas formulaciones adolecen de un problema. Cualquier teoría que implique nueva física —como la teoría de cuerdas— requiere postular nuevas partículas. Estas podrían tener una masa enorme, lo cual explicaría por qué aún

PÁGINAS ANTERIORES: CORTESÍA DEL CERN





LAS ACTUALIZACIONES del experimento CMS (*izquierda*) ayudarán en la búsqueda de supersimetría. La producción de nuevas partículas podría generar un suceso similar al reproducido arriba, una falsa alarma observada en 2012: dos chorros de partículas (*rojo y azul*) que escapan hacia un mismo lado delatan que otras —tal vez supercompañeras «oscuras»— han escapado en sentido opuesto sin ser registradas.

CORTESÍA DEL CERN (*detector CMS*); CORTESÍA DE LA COLABORACIÓN CMS (*suceso*)

no han sido generadas en los aceleradores. Sin embargo, aun sin crearlas de manera directa, la existencia de partículas de gran masa debería afectar al comportamiento de las partículas ordinarias, como el bosón de Higgs. La razón para ello se encuentra en las extrañas propiedades del mundo cuántico.

Según la mecánica cuántica, las partículas se comunican entre sí mediante el intercambio de cuantos virtuales que aparecen y se desvanecen. Así, la repulsión que experimentan dos electrones queda descrita, en una primera aproximación, por el intercambio de un fotón virtual. A mediados del siglo pasado, Richard Feynman dedujo unas reglas muy elegantes para describir los efectos cuánticos en términos de interacciones entre partículas estables y partículas virtuales.

En mecánica cuántica, todo aquello que no está estrictamente prohibido acaba ocurriendo, aunque sea de manera ocasional. Eso quiere decir que los electrones no solo intercambian fotones virtuales, sino también partículas de otros tipos, como las postuladas por las extensiones del modelo estándar. Pero, a menos que echemos mano de algo como la supersimetría, esas nuevas interacciones provocarán problemas.

Consideremos el bosón de Higgs, asociado al campo que da masa a las partículas elementales. Si, además del higgs, existiesen otras partículas de masa muy elevada, uno y otras se comunicarían mediante interacciones cuánticas virtuales. Y puede demostrarse que, en tal caso, el bosón de Higgs se volvería superpesado. Todo lo que existe en el universo se convertiría en partículas de masa enorme, y usted y nosotros nos transformaríamos en agujeros negros. La mejor explicación de por qué algo así no ocurre nos la proporciona la supersimetría.

LA PROMESA DE LA SUPERSIMETRÍA

La idea básica de la supersimetría, apodada «SUSY» por los físicos teóricos, fue desarrollada durante los años setenta a raíz de los estudios sobre el papel de las simetrías en física de partículas. La supersimetría no se corresponde con ninguna teoría en concreto, sino más bien con un marco general en el que formular modelos del universo.

Las leyes que rigen la física de partículas incorporan en su estructura interna numerosas simetrías. Por ejemplo, a dichas leyes no les importa dónde nos encontramos, en qué dirección miramos o si nos movemos o no con respecto a los objetos cuyas propiedades estamos midiendo. Una consecuencia matemática de esas simetrías espaciotemporales es la conservación de ciertas magnitudes, como la energía, el momento y el momento angular. A partir de las simetrías mismas puede derivarse la relación entre energía, masa y momento de la que surge la célebre ecuación $E = mc^2$. Todo esto se entiende bastante bien desde 1905, año en que Albert Einstein formuló la teoría de la relatividad especial.

La física cuántica parece respetar tales simetrías. Tanto es así que, históricamente, los físicos se han servido de ellas para predecir nuevos fenómenos. En 1930, Paul Dirac demostró que, al combinar la mecánica cuántica con la relatividad especial, las simetrías espaciotemporales implicaban que cada tipo de partícula había de tener asociada su correspondiente antipartícula. En aquel momento la idea parecía una locura, ya que hasta entonces no se había detectado la antimateria. Sin embargo, el tiempo dio la razón a Dirac.

La supersimetría se basa en un argumento similar. Postula una extensión cuántica del espaciotiempo ordinario, el *superespacio*, en el que las partículas serían simétricas.

Las dimensiones adicionales del superespacio no son como las del espacio normal (izquierda-derecha o arriba-abajo, por ejemplo), sino dimensiones fermiónicas. El movimiento en una de ellas resulta muy limitado. A lo largo de una dimensión espacial ordinaria podemos avanzar tanto como deseemos. En una dimensión fermiónica, en cambio, nuestros pasos estarán cuantizados: una vez demos uno, la dimensión «estará llena». Si queremos avanzar más, deberemos hacerlo en otra dimensión fermiónica o dar un paso atrás.

Para un bosón, dar un paso en una dirección fermiónica lo convierte en un fermión; en el caso de un fermión, moverse en una dirección fermiónica lo transforma en un bosón. Además, si nos desplazamos en una dirección fermiónica y después volvemos atrás, descubriremos que hemos efectuado un desplazamiento en el espaciotiempo ordinario. El movimiento en las dimensiones fermiónicas se mezcla con los desplazamientos ordinarios según reglas complejas.

¿Qué importancia reviste todo esto? En un mundo supersimétrico, las simetrías a lo largo de las direcciones fermiónicas restringen las posibles interacciones entre partículas. En concreto, las teorías supersimétricas llamadas «naturales» suprimen en gran medida los efectos de las partículas virtuales. Impiden que el bosón de Higgs interaccione con las partículas de alta energía de tal modo que nos convirtamos en agujeros negros. (Las teorías supersimétricas «no naturales» requerirían postular algún otro mecanismo que evite tales efectos.) Así pues, la supersimetría natural allana el camino para explorar nuevas ideas que den sentido al modelo estándar.

LA BÚSQUEDA DE SUPERSIMETRÍA

En toda teoría supersimétrica, cada partícula bosónica ha de tener asociada una supercompañera fermiónica, y viceversa. Dado que los bosones y los fermiones conocidos no parecen ser compañeros supersimétricos unos de otros, la supersimetría solo puede ser correcta si existe un gran número de partículas que, por algún motivo, aún no hemos descubierto.

Ahí reside el problema. En las versiones más simples y potentes de la supersimetría (la supersimetría natural), las supercompañeras de las partículas conocidas no deberían ser mucho más masivas que el bosón de Higgs. Por tanto, tendrían que poder generarse en el LHC. De hecho, hace apenas unos diez años, la mayoría de los físicos habría apostado que a estas alturas ya habrían aparecido los primeros indicios de su existencia.

Uno de nosotros (Spiropulu) recuerda la siguiente anécdota: una noche de 2009, justo antes de medianoche, fui a trabajar como jefa de turno del detector CMS. La sala de control se encontraba llena de físicos, cada uno a cargo de uno de los subsistemas del complejo detector de 14.000 toneladas. A las dos de la madrugada recibí una llamada del centro de control del CERN, en el extremo opuesto del anillo de 27 kilómetros. Había llegado la hora de la verdad: intentaríamos efectuar las colisiones de protones más energéticas de la historia.

Di las señales para que los distintos componentes del detector CMS se unieran, extremando el cuidado y dejando las partes más frágiles para el final. A las 4:11 todo el detector cobró vida. Un ejército de monitores se volvió loco cuando los sistemas electrónicos ultrarrápidos comenzaron a proyectar las gráficas de las colisiones que, a un ritmo de 20 millones por segundo, se estaban produciendo a cien metros bajo nuestros pies. Tras una década buscando partículas supersimétricas en el acelerador Tevatrón de Fermilab, cerca de Chicago, mi corazón se sobresaltó ante la posibilidad de reconocer una señal delatora. Pero, aunque resulta tentador analizar las colisiones a simple vista, es imposible hacer descubrimientos de esa manera.

Tras haber construido un acelerador de 8000 millones de euros, nadie espera que los hallazgos lleguen la primera noche de funcionamiento. Tampoco durante el primer año. A pesar de ello, todos albergábamos grandes esperanzas desde el principio. Las colaboraciones CMS y ATLAS habíamos elaborado un plan muy detallado para buscar indicios de supersimetría en los primeros datos del LHC. Habíamos pisado el acelerador para encontrar partículas de materia oscura en las señales de supersimetría; no de manera directa, sino en forma de energía «desaparecida»: un desajuste muy característico en el que se observan partículas que parecen retirarse de algo que los detectores no registran. Incluso llegamos a preparar la plantilla del artículo que anunciaría el descubrimiento, con título y fecha.

Hoy, el artículo está todavía por escribir. Los experimentos solo han dejado unas pocas ventanas por explorar en las que aún podrían ocultarse las partículas supersimétricas. No pueden ser demasiado ligeras, pues entonces ya las habríamos descubierto, pero tampoco demasiado masivas, ya que en tal caso no suprimirían de manera efectiva el efecto de las interacciones virtuales. Si el LHC no las encuentra en la próxima ronda de experimentos, la crisis se disparará.

LA VIDA DESPUÉS DE LA SUPERSÍMETRÍA

Los teóricos no están dispuestos a renunciar a una versión más general de la supersimetría, por más que esta no posea todas las propiedades que hacen tan atractiva a la supersimetría natural. Como mencionábamos más arriba, la supersimetría no implica ningún modelo particular, sino solo un marco genérico. Por tanto, aunque las propuestas actuales queden excluidas, siempre cabe la posibilidad de que los datos futuros confirmen su existencia.

Durante una charla en el Instituto Kavli de Física Teórica, en la Universidad de California en Santa Bárbara, Nima Arkani-Hamed, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, analizaba el futuro de la supersimetría ante un auditorio repleto: ¿qué ocurriría si la supersimetría no apareciese en el LHC? En tal caso, adujo, los físicos construiremos nuevos modelos que sitúen la masa de las partículas supersimétricas justo por encima del alcance de los experimentos. Pero ¿no sería eso cambiar de chaqueta? No importa: los físicos no tienen por qué ser coherentes; basta con que lo sean sus teorías.

Esa fidelidad a la supersimetría se encuentra muy extendida. A pesar de todo, los físicos ya admiten que la supersimetría natural comienza a tener problemas y que acabará en la papelera de la historia si las supercompañeras no aparecen pronto. En el pasado, tales encrucijadas han conducido a cambios de paradigma. Hace más de un siglo, la imposibilidad de detectar el éter luminífero espoleó la formulación de la relatividad especial.

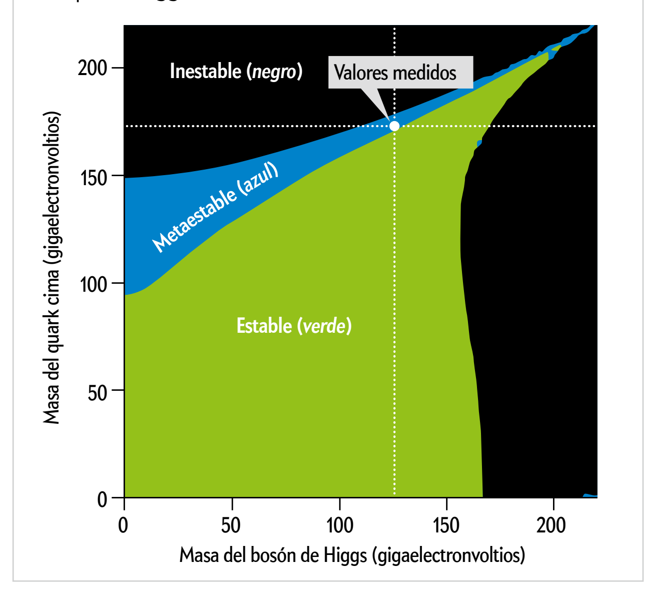
Si la supersimetría no constituye una descripción correcta del mundo, ¿qué podría reemplazarla? Aquí mencionaremos tres posibilidades especulativas, las cuales implican formas radicalmente nuevas de pensar en la física y la cosmología básicas:

CONSECUENCIAS CÓSMICAS

Al borde del abismo

El bosón de Higgs ha revelado la existencia del campo de Higgs: un campo de energía que impregna el cosmos, confiere masa a las partículas elementales y, hasta donde sabemos, toma un valor constante en todos los puntos del espacio.

El valor de la masa del bosón de Higgs, medida hace poco en el LHC, parece indicar que el campo de Higgs no sería completamente estable. Los efectos cuánticos podrían provocar una transición a un estado de menor energía, un proceso que destruiría el universo tal y como lo conocemos. (No se preocupe: algo así no debería ocurrir hasta dentro de miles de millones de años.) La supersimetría ayudaría a estabilizar el campo de Higgs.



A PARTIR DE: «HIGGS MASS AND VACUUM STABILITY IN THE STANDARD MODEL AT NNLO», POR GIUSEPPE DEGRASSI ET AL. EN *JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS*, VOL. 2012, N.º 8, ARTÍCULO 98, AGOSTO DE 2012

El multiverso: Las intensidades de las interacciones fundamentales y los valores relativos de las masas de las partículas son números cuyo origen constituye un misterio. La idea de que pudieran ser aleatorios no resulta muy agradable, porque, si tomasen valores ligeramente diferentes, el universo sería un lugar muy distinto del que conocemos: los átomos no se formarían con facilidad y no habría vida. En la jerga de la física teórica, decimos que nuestro universo parece estar «finamente ajustado». La supersimetría aspira a explicar el valor de esos parámetros labrando una escalera hacia niveles físicos más profundos. Pero ¿y si esa escalera no existe?

En tal caso, nos vemos abocados a considerar la posibilidad de que dicho «ajuste» no sea más que un mero accidente, una noción que se torna más atractiva si postulamos la existencia de un multiverso. Según este escenario, la gran explosión que dio origen al cosmos observable habría producido, además, un sinnúmero de universos que no vemos. Por tanto, ante la pregunta de por qué el electrón tiene la masa que tiene, la respuesta sería: «Pura suerte. En otras regiones del multiverso hay electrones con masas diferentes». Solo en los universos cuyos parámetros permiten la existencia de vida habrá físicos preguntándose por qué la supersimetría natural no aparece en sus experimentos.

No obstante, para numerosos investigadores, el multiverso guarda un desagradable parecido con invocar un ejército de ángeles invisibles. Para el nóbel David Gross, apelar a condiciones iniciales imposibles de verificar equivale a tirar la toalla.

Dimensiones extra: Lisa Randall, de Harvard, y Raman Sundrum, de la Universidad de Maryland, demostraron hace unos años que, si el espacio poseyese una dimensión más y esta exhibiese una geometría «combada», ello explicaría por qué la gravedad resulta tan débil en comparación con el resto de las interacciones. Por otro lado, las dimensiones extra del espacio pasarían inadvertidas si fuesen de tamaño microscópico; sin embargo, su longitud y su forma podrían ejercer efectos observables en los procesos físicos de altas energías. En esta clase de escenarios, en lugar de detectar compañeros supersimétricos esperaríamos encontrar los «modos de Kaluza-Klein»: partículas exóticas cuya masa viene dada por su cantidad de movimiento en las dimensiones adicionales.

Transmutación dimensional: En lugar de apelar a la supersimetría para suprimir los efectos de las partículas virtuales, otra propuesta consiste en basarse en dichos efectos para explicar el origen de la masa. Consideremos el caso del protón. Esta partícula no es elemental, sino que se encuentra formada por tres quarks, dotados de una masa minúscula, los cuales intercambian gluones, que carecen de masa. Sin embargo, la masa del protón resulta mucho mayor que la suma de las masas de esos quarks y gluones. ¿A qué se debe? En realidad, la mayor parte de la masa del protón procede de los campos energéticos de la interacción nuclear fuerte. Sus propiedades nos permiten predecir la masa del protón a partir de números ordinarios (adimensionales), como π.

Se trata de una situación muy extraña en física de partículas. Por lo general, solo podemos calcular masas a partir de los valores de otras masas. De hecho, el modelo estándar no permite predecir la masa del bosón de Higgs: hemos de medirla. Esto parece un error evidente, dado lo bien que podemos calcular la masa del protón. A partir de un trabajo pionero de William A. Bardeen, físico del Fermilab, algunos teóricos han comenzado a explorar la posibilidad de que la masa del higgs se genere a través de un proceso similar, llamado transmutación dimensional.

Conservar los efectos útiles de las partículas virtuales y evitar los desastrosos —el papel que de otro modo desempeñaría la supersimetría— implica abandonar especulaciones muy populares sobre la unificación de las leyes físicas a energías muy elevadas. También hace aún más misteriosa la buscada conexión entre la mecánica cuántica y la relatividad general. Sin embargo, este enfoque goza de otras ventajas. En estos modelos, los mismos efectos cuánticos pueden generar masa para las partículas de la materia oscura. También predicen que la materia oscura interacciona con las partículas ordinarias a través de una fuerza mediada por el bosón de Higgs. Durante los próximos años, esta predicción radical será puesta a prueba en el LHC y en los experimentos subterráneos dedicados a la búsqueda de materia oscura.

Tal vez el bosón de Higgs encierre otras pistas. Su hallazgo ha demostrado la existencia de un campo de energía, el campo de Higgs, que impregna todo el universo y que da masa a las partículas elementales. Eso significa que el espacio «vacío» posee en realidad una estructura muy rica, en la que el campo de Higgs y las partículas virtuales generan una dinámica compleja. En este contexto, cabe preguntarse si el vacío es de veras estable o si, algún día, un suceso cuántico desencadenará una transición catastrófica hacia un vacío «limpio».

La supersimetría contribuye a impedir tales percances. Pero, sin supersimetría, la estabilidad del vacío depende en gran medida del valor concreto de la masa del bosón de Higgs: un higgs algo más pesado implicaría un universo estable, pero uno más ligero nos abocaría a la destrucción. Curiosamente, el valor medido en el LHC se encuentra justo en el borde. Ello entraña que nuestro vacío gozaría de una vida muy larga, pero sin ser completamente estable (*véase el recuadro* «Al borde del abismo»). La naturaleza está intentando decirnos algo, pero no sabemos qué.

Si las partículas supersimétricas comienzan a aparecer en la próxima fase de experimentos del LHC, la ansiedad que ahora reina entre los físicos se verá reemplazada por la incontenible emoción de haber cruzado, por fin, el umbral del supermundo. En caso contrario, habremos de enfrentarnos a una ruptura con el paradigma imperante en física de partículas. La mera posibilidad ya ha comenzado a inspirar una revisión radical en nuestra manera de entender el mundo microscópico. Comprender mejor las propiedades del bosón de Higgs resultará esencial para encontrar un nuevo paradigma. Un indicio experimental sobre la materia oscura, esa anomalía solitaria pero persistente de la física de partículas, podría ser el faro que nos indique el camino.

PARA SABER MÁS

Supersymmetry: Unveiling the ultimate laws of nature. Gordon Kane. Basic Books, 2001.

Supersimetría en el CERN: **http://home.web.cern.ch/about/physics/supersymmetry**

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Es supersimétrica la naturaleza? Howard E. Haber y Gordon L. Kane en *IyC*, agosto de 1986.

Más allá del modelo estándar de la física. Gordon Kane en *IyC*, agosto de 2003.

Salir de la oscuridad. Georgi Dvali en *IyC*, abril de 2004.

¿Existe el multiverso? George F. R. Ellis en *IyC*, octubre de 2011.

¿Ha muerto la supersimetría? Davide Castelvecchi en *IyC*, mayo de 2012.

Durante décadas los antropólogos han debatido sobre cómo y cuándo se convirtieron nuestros antepasados en unos cazadores experimentados. Hallazgos recientes arrojan una sorprendente imagen

Kate Wong

EVOLUCIÓN

El origen de la caza en los humanos



HOMO ERGASTER **probablemente era un cazador eficaz. Aquí se muestra el esqueleto de uno de sus representantes, el niño de Turkana (Kenia), de 1,6 millones de años de antigüedad.**

Hace 279.000 años,

cerca de un gran lago en el centro del valle del Rift, en Etiopía, unos cazadores elaboraban con esmero unas pequeñas y afiladas puntas a partir de oscuros bloques de vidrio volcánico. Después de tallar este material quebradizo para crear filos cortantes, unían cada una de las puntas a un mango de madera para obtener una jabalina. Aunque para los estándares actuales podría parecer un avance técnico modesto, se trataba de una invención revolucionaria. Gracias a ella, los miembros de nuestro linaje disponían de un arma que les permitía cazar a distancia con más eficacia que con una sencilla lanza de madera. Pero no solo podían alcanzar una mayor variedad de animales; también tenían más posibilidades de salir indemnes de la caza al poner una distancia de seguridad entre ellos y las presas grandes y peligrosas, incluidos los hipopótamos que acechaban en los alrededores del lago.

Si la valoramos en su contexto, esa lanza con una punta de piedra puede considerarse el mayor logro de la humanidad de su tiempo. Pero aparte de las ventajas que supuso para la caza, quizá resulte aún más destacable el hecho de que se llegara a idear, fabricar y usar este dispositivo en apariencia sencillo gracias a la adquisición, a lo largo de decenas miles de generaciones, de los rasgos que ayudaron a nuestros antepasados a obtener carne.

En una época dominada por los supermercados y la comida rápida, se tiende a olvidar que los humanos somos cazadores natos. Cierto es que somos lentos, débiles y carecemos de los dientes y garras letales que esgrimen otros animales frente a sus presas. En comparación con otros carnívoros, como los cocodrilos o los guepardos, parecemos muy poco adaptados para la caza. No obstante, somos los depredadores más mortíferos del planeta, un honor que logramos mucho antes de crear vehículos o armas de fuego con las que perseguir y abatir a nuestras presas.

A lo largo de millones de años la evolución transformó a nuestros antepasados, la mayoría vegetarianos (seres como la famosa Lucy, perteneciente a la especie *Australopithecus afarensis*), en un singular y letal primate. De hecho, muchas de las características que nos distinguen de nuestros parientes más próximos, los grandes simios, habrían surgido, al menos en parte, como adaptaciones a la caza. Entre ellas se hallarían la capacidad de correr largas distancias o el cerebro voluminoso. Descubrimientos recientes han proyectado algo de luz sobre algunas fases poco conocidas de esta metamorfosis; además de otros aspectos, han documentado el origen de nuestro brazo propulsor y los primeros indicios sobre la caza de grandes presas. Con esta nueva información, se dispone ahora de una mejor idea sobre la aparición de los rasgos que nos convirtieron en un diestro cazador y de cómo estos nos hicieron humanos.

UN MUNDO FELIZ

Para entender la importancia de la caza en nuestra evolución debemos retroceder unos tres millones de años, a un momento en que los primeros homininos (seres más estrechamente relacionados con nosotros que nuestros parientes vivos más próximos, los chimpancés y los bonobos) se acercaban a una encrucijada. El clima estaba cambiando y, en toda África, los bosques y zonas arboladas, donde nuestros antepasados habían obtenido frutas y hojas durante mucho tiempo, iban dando paso a pastizales, donde estos alimentos resultaban escasos. Los homininos debían adaptarse o, de lo contrario, se extinguirían. Algunos, como los australopitecos robustos, habrían hecho frente a los cambios ambientales al desarrollar enormes mandíbulas y dientes con los que podían moler hierbas y otros vegetales duros. El linaje que incluye a nuestro género *Homo* tomó un camino totalmente diferente al ampliar la dieta y consumir cantidades crecientes de proteína y grasa animal. Ambas soluciones permitieron a nuestros predecesores sobrevivir durante largo tiempo. Pero hace alrededor de un millón de años los australopitecos robustos se extinguieron.

Puede que nunca se llegue a saber con exactitud el motivo de su desaparición. Quizá se habían especializado tanto que, cuando varió una vez más el ambiente, no lograron reaccionar de nuevo para explorar otras opciones de alimentación. O tal vez fueron dominados por los representantes del género *Homo*.

PÁGINA ANTERIOR: KENNETH GARRETT, *Alamy*

EN SÍNTESIS

Durante décadas los investigadores han estado enzarzados en un debate sobre cómo y cuándo surgió la caza en los humanos y qué papel ha desempeñado en nuestra evolución.

Estudios recientes sobre la anatomía humana, la industria lítica y los restos de fauna están aportando nuevos detalles sobre este cambio en la estrategia de subsistencia que conllevó el consumo de carne.

Los datos indican que la caza apareció mucho antes de lo que algunos científicos pensaban y tuvo una profunda influencia en las etapas siguientes de la evolución humana.

Lo que sí está claro es que este último linaje, al añadir carne animal a su dieta, optó por una estrategia que le ayudaría a imperar en todo el planeta.

Numerosas modificaciones en la anatomía de nuestros antepasados contribuyeron a convertirlos en formidables competidores en la sabana, donde los tigres de dientes de sable y otros grandes carnívoros habían reinado durante mucho tiempo. Para compensar su falta de velocidad, los homininos desarrollaron un importante conjunto de rasgos. Aunque, desde entonces, la locomoción bípeda nos ha hecho lentos en las carreras cortas, en las de resistencia somos excelentes. Ningún otro primate actual posee nuestra habilidad para correr. Daniel Lieberman, de la Universidad Harvard, y Dennis Bramble, de la Universidad de Utah, han propuesto que esta capacidad surgió para ayudar a los homininos a cazar, ya que les permitía perseguir a sus presas hasta que estas se cansaban por extenuación. A juzgar por algunos indicios del registro fósil, como el mayor tamaño de las articulaciones de las piernas y dedos del pie más cortos, la carrera de resistencia apareció en el género *Homo* hace unos dos millones de años.

Varios cambios fisiológicos acompañaron a los anatómicos. Con un nivel de actividad mayor que el de sus antepasados, los homininos necesitaron un mecanismo para evitar el calentamiento excesivo. Según la hipótesis de Nina Jablonski, de la Universidad estatal de Pensilvania, la pérdida del pelo y el desarrollo de unas glándulas especiales en la piel que facilitaban la sudoración ayudaron a nuestros ancestros a refrescarse mientras corrían [*véase* «Origen de la piel desnuda», por Nina G. Jablonski; Investigación y Ciencia, abril de 2010]. Con la evolución de este sistema de refrigeración, que Jablonski sitúa hace unos 1,6 millones de años en *Homo ergaster*, los humanos podemos vencer a un caballo en una maratón.

HALLAZGOS

Anatomía de un cazador

A diferencia de otros depredadores, los humanos somos lentos, débiles y carecemos de colmillos y garras letales. Pero nuestros antepasados desarrollaron una serie de rasgos (*en la imagen se señalan los más representativos*) que nos permitieron superar estas limitaciones.

Mente creativa
Un cerebro de gran tamaño nos ayudó a inventar nuevas técnicas para matar y descuartizar las presas.



Manos diestras
Un pulgar largo y una muñeca fuerte nos proporcionaron la habilidad manual y el agarre firme que se necesitan para elaborar y utilizar instrumentos.

Brazo propulsor
Una cintura flexible, un húmero menos curvado y una articulación del hombro orientada lateralmente nos permiten lanzar objetos con gran velocidad y precisión. Tal capacidad favoreció la caza con armas arrojadizas.

Diseño de corredor
Una pelvis estrecha, unas piernas largas, un glúteo mayor más desarrollado, unas articulaciones de las piernas más grandes y unos dedos cortos del pie facilitan la carrera de larga distancia, lo que ayudaría a nuestros antepasados a perseguir las presas.

BROWNBIRD DESIGN

Sin embargo, perseguir a las presas con pies ligeros solo contribuía a la mitad de la tarea. Para completarla los cazadores debían dar el golpe mortal, con preferencia mediante un objeto contundente o afilado que pudiera ser lanzado desde una distancia segura. ¿Poseían este rasgo los primeros *Homo*? Los humanos actuales destacamos por nuestros lanzamientos rápidos y precisos, al contrario de los chimpancés, que realizan esta acción de forma pésima. En tiempo reciente, Neil T. Roach, de la Universidad George Washington, y su equipo se propusieron determinar por qué los humanos aventajamos a los chimpancés en el lanzamiento y cuándo adquirimos esta capacidad. Según han demostrado, la clave radica en la elasticidad de los músculos de nuestros hombros. Mediante el estudio de jugadores de béisbol universitario, Roach y sus colaboradores han identificado tres atributos actuales de los humanos, ausentes en chimpancés, que mejoran en gran medida la amplitud de movimiento de nuestra extremidad superior y, por consiguiente, su capacidad de almacenar y liberar esta energía. Estas características son una cintura muy flexible, un húmero menos curvado y una articulación del hombro orientada lateralmente (no hacia arriba, como en los simios).

Al analizar el registro fósil, el equipo de Roach averiguó el momento en que aparecieron estos rasgos que permitieron el lanzamiento rápido. No se presentaron a la vez, sino que lo hicieron en forma de mosaico. En primer lugar, los australopitecinos desarrollaron una cintura flexible y un húmero más recto. El cambio en la orientación de la articulación de la escápula surgió más tarde, hace unos dos millones de años, en *Homo erectus*.

Resulta difícil tener la certidumbre de que la aparición de un carácter por selección natural se deba a una función en particular, como la carrera de resistencia o el lanzamiento que facilitan la caza. En algunos casos, la selección podría haber favorecido

al inicio un rasgo por una razón totalmente distinta, y luego se vio que servía para otra actividad. Por ejemplo, nuestra cintura pareció evolucionar junto a otro conjunto de rasgos relacionados con la locomoción bípeda. Pero más tarde, con la aparición de otras características complementarias, adquirió una nueva función. Ayudó a nuestros antepasados a aumentar la torsión del tronco y con ello la fuerza con que arrojaban los objetos contra el blanco.

No obstante, Roach piensa que, para mejorar el lanzamiento, la selección fomentó los cambios que se produjeron en el hombro hace dos millones de años. En parte porque tales cambios empeoraron otra habilidad importante de nuestros antepasados: trepar a los árboles, una conducta que durante mucho tiempo les había permitido alimentarse y refugiarse de los depredadores terrestres. «Al perder esa destreza, debieron recibir algo a cambio», señala Roach. Un brazo mejor adaptado para el lanzamiento permitiría a *Homo* obtener alimentos de origen animal ricos en calorías y, al mismo tiempo, defenderse de los depredadores que le intentaban atacar o robar sus presas.





LOS PRIMEROS INDICIOS DE CAZA corresponden a instrumentos de corte de hace dos millones de años (*1*) y huesos de animales con marcas de corte (*2*) del yacimiento de Kanjera Sur, en Kenia. Posteriormente, nuestros ancestros inventaron armas de caza más letales, como las lanzas con puntas de piedra halladas en Kathu Pan, en Sudáfrica (*reconstruidas en la imagen 3*), y puntas de flecha o dardos de hace 71.000 años procedentes de Pinnacle Point, también en Sudáfrica (*4*).

HUESOS DESCUARTIZADOS

El registro fósil indica que hace dos millones de años los homininos ya disponían del conjunto de rasgos anatómicos que les permitía cazar mejor. Pero por sí solo no demuestra si en ese momento ya los utilizaban para cazar de forma sistemática. Para ello, los científicos deben hallar otros indicios de caza en el registro arqueológico, una tarea nada fácil. Las herramientas de piedra y huesos con marcas de corte indican que nuestros antepasados empezaron a despedazar animales hace 2,6 millones de años. Pero ¿mataban ellos mimos a las presas, o dejaban que los grandes felinos y otros carnívoros hicieran esta tarea?

Los expertos han debatido durante décadas sobre si los primeros *Homo* eran cazadores o carroñeros. La prueba inequívoca más antigua de caza consiste en unas lanzas de madera y restos de animales procedentes del yacimiento alemán de Schöningen, de solo 400.000 años de antigüedad. Pero en los últimos años, el estudio de varios conjuntos de restos de animales troceados, hallados en distintos lugares de África oriental, han aportado pruebas convincentes de que la caza apareció mucho antes, en la época de los primeros *Homo*.

Uno de estos conjuntos pertenece al yacimiento FLK Zinj, en la famosa garganta de Olduvai, en Tanzania. Hace unos 1.800.000 años los homininos transportaron hasta allí esqueletos de ñúes y de otros grandes mamíferos para descuartizarlos y comerlos. La paleoantropóloga Mary Leakey excavó la mayor parte del yacimiento en los años sesenta del siglo XX y los especialistas han estado discutiendo desde entonces sobre si los animales eran cazados o carroñados. Henry T. Bunn, de la Universidad de Wisconsin-Madison, mientras intentaba resolver esta duda, cayó en la cuenta de que estas tácticas deberían haber dejado una señal distintiva en el perfil de mortalidad. Cuando se trata de caza mayor, como los antílopes, los leones tienden a capturar una proporción mucho más alta de individuos viejos que la que existe en toda la manada. Por tanto, si los humanos hubieran carroñado los animales cazados por leones u otros grandes carnívoros, el conjunto de FLK Zinj debería mostrar de igual modo una mayor representación de individuos viejos. En cambio, Bunn y sus colaboradores hallaron que entre los restos de grandes mamíferos descuartizados abundaban más los de edades intermedias que los de animales viejos o juveniles. Tal pauta es la que esperaríamos observar si fuesen los humanos los que escogían los animales que ellos mismos cazaban.

De hecho, las edades de las presas de FLK Zinj se asemejan mucho a las de los animales que capturan hoy los cazadores-recolectores hadza de Tanzania y los san en Botsuana con arcos y flechas. Por lo que sabemos, en esa época *Homo* aún no había inventado armas arrojadizas de largo alcance, como el arco y las flechas. Pero Bunn piensa que los homininos podrían haber practicado la caza mediante emboscadas. Apostados en los árboles cercanos a las fuentes de agua podrían haber lanzado, desde una corta distancia, lanzas de madera a los animales que se dirigían confiadamente a beber.

Los registros más antiguos de caza proceden del oeste de Kenia, del yacimiento Kanjera Sur, a orillas del lago Victoria. Allí, Joseph Ferraro, de la Universidad de Baylor, Thomas W. Plummer, de la Universidad de la Ciudad de Nueva York, y sus colaboradores han descubierto miles de herramientas de piedra y huesos de animales a los que se les había extraído la carne y la médula ósea. La mayoría de los huesos, que datan de hace unos dos millones de años, pertenecen a antílopes jóvenes y muestran muy pocas marcas de carnívoros. Lo que apoya la idea de que los homininos cazaban a las presas, en lugar de aprovecharse de las sobras de los carnívoros. Además, Plummer argumenta que, dado el reducido tamaño de los antílopes, si los grandes carnívoros los hubieran matado los habrían consumido por completo sin dejar ningún rastro.

Según Plummer, los restos de Kanjera constituyen hasta el momento la prueba más antigua de la caza. En este yacimiento los homininos no se limitaron a consumir carne de forma esporádica para después volver a la dieta vegetariana. Los huesos proceden de sedimentos que representan cientos o quizá miles de años, lo que indica una alimentación carnívora continuada. Estos individuos se hallaban adaptados a ingerir importantes cantidades de tejidos animales. No era lo único que comían, ya que el análisis de las herramientas del yacimiento demuestra

CORTESÍA DE THOMAS W. PLUMMER (*1*); CORTESÍA DE JOSEPH FERRARO (*2*); CORTESÍA DE JAYNE WILKINS (*3*); CORTESÍA DE TOVË RUTH SMITH Y SIMEN OESTMO (*4*)


3


4

que también consumían plantas, incluidos algunos tubérculos; pero la carne formaba la parte principal de su dieta.

IMPACTO PROFUNDO

Es difícil sobrevalorar la repercusión que tuvo en *Homo* la adquisición de una dieta más carnívora. Los datos del registro fósil y del arqueológico indican que se estableció un mecanismo de retroalimentación entre el acceso a alimentos más calóricos y el aumento del volumen cerebral. Tal crecimiento llevó a la invención de técnicas que permitían a nuestros antepasados obtener aún más carne (así como alimentos vegetales de alta calidad), lo que a su vez favoreció una mayor expansión de nuestra materia gris. Como resultado, hace entre dos millones y 200.000 años, el tamaño del cerebro pasó de unos 600 centímetros cúbicos de media en los primeros representantes del género *Homo* a unos 1300 centímetros cúbicos en *Homo sapiens*.

La carnivoría también habría modificado profundamente la dinámica social de nuestros antepasados, sobre todo cuando comenzaron a cazar presas más grandes que podían compartirse con otros miembros del grupo. Travis Pickering, de la Universidad de Wisconsin-Madison, explica que este desarrollo condujo a una mayor organización social en los primeros *Homo*. Surgió así la división del trabajo: los hombres realizaban la caza mayor, mientras que las mujeres recolectaban plantas. Al final del día todo el grupo se reunía para compartir los alimentos. Pickering opina que cuando nuestros antepasados cazaban animales grandes, como los ñúes de FLK Zinj, ya presentaban tal organización. Y aunque hoy este pacto pueda parecer anticuado, el reparto de las responsabilidades entre ambos sexos resultó ser una adaptación de los homininos con un enorme éxito.

Pickering sospecha, además, que el consumo de carne favoreció el autocontrol en nuestros antepasados. Aunque la opinión tradicional sostiene que la caza promueve la agresividad en los humanos —un punto de vista basado en la observación de los chimpancés, que cazan de forma agresiva— él cree que fomenta la prudencia. A diferencia de los chimpancés, dotados de una gran fuerza y dientes letales, los primeros humanos no podrían haber capturado a sus presas mediante un ataque violento. Pickering argumenta que adquirieron control sobre las emociones, ya que cazaban utilizando su cerebro y no sus músculos. En su opinión, el uso de herramientas que les permitían matar desde lejos les habría ayudado a desvincularse de las emociones agresivas de la caza.

Esta hipótesis ha sido reforzada por la primatóloga Jill Pruetz, de la Universidad estatal de Iowa, quien ha estudiado una población singular de chimpancés de las praderas de Senegal. A diferencia de sus homólogos de la selva, que cazan otros monos grandes y peligrosos con sus propias manos, los chimpancés senegaleses capturan sobre todo gálagos (unos primates nocturnos diminutos) con palos afilados que introducen en los huecos de los árboles, donde las presas duermen durante el día. Pickering señala que los chimpancés senegaleses cazan de una forma mucho más sutil que los de la selva, que matan a sus presas con golpes frenéticos. Es posible que las «lanzas» utilizadas por los primeros les ayuden a mantener la calma.

La caza también nos hizo humanos en otro aspecto. *H. sapiens* es la única especie entre todos los primates que ha colonizado todos los rincones del planeta. Durante los primeros cinco millones de años de evolución, nuestros predecesores homininos vivieron dentro de los límites de África. Pero en los últimos dos millones de años, *Homo* acrecentó su distribución y llegó a otras partes del Viejo Mundo. ¿Por qué de repente surgió esta pasión por viajar? Las teorías abundan, pero tal vez la caza le empujó a abandonar su lugar de origen. En aquel momento, gran parte de Eurasia se hallaba cubierta por pastizales de sabana similares a los de África, donde *Homo* solía cazar. De este modo, cuando realizó sus primeros pasos fuera del continente, quizás estuviera siguiendo a sus presas.

En los milenios siguientes se produjeron muchas más migraciones de homininos, cada una provocada por diferentes circunstancias. Y aunque los desplazamientos de nuestros predecesores no siempre estuvieran motivados por la persecución de las presas, su capacidad para colonizar nuevos lugares y prosperar en condiciones ecológicas totalmente diferentes radicó en sus rasgos físicos y comportamiento singulares. *Homo* se convirtió así en el depredador menos esperado y más exitoso que el mundo haya conocido jamás.

Kate Wong *es redactora de* Scientific American.

PARA SABER MÁS

Earliest archaeological evidence of persistent hominin carnivory. Joseph V. Ferraro et al. en *PLOS ONE*, vol. 8, n.º 4, art. e62174, 25 de abril de 2013.

Elastic energy storage in the shoulder and the evolution of high-speed throwing in *Homo*. Neil T. Roach et al. en *Nature*, vol. 498, págs. 483-487, 27 de junio de 2013.

Prey mortality profiles indicate that early Pleistocene *Homo* at Olduvai was an ambush predator. Henry T. Bunn y Alia N. Gurtov en *Quaternary International*, vols. 322-323, págs. 44-53, 16 de febrero de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Incidencia de la dieta en la hominización. William R. Leonard en *IyC*, febrero de 2003.





Considerado durante mucho tiempo una molécula con simples funciones de mantenimiento celular, el ARN se contempla ahora en el desarrollo de tratamientos médicos novedosos

Christine Gorman y Dina Fine Maron

ANNA PARINI

La historia de la biología molecular, que comenzó con la descripción de la estructura en doble hélice del ADN en 1953, ha ofrecido más personajes que una novela rusa. Los biólogos han identificado decenas de miles de moléculas que dirigen y dan forma al caos organizado en el interior de las células del cuerpo, y han aprovechado esos hallazgos para desarrollar miles de fármacos y tratamientos.

Durante décadas, dos protagonistas ocuparon el centro de la escena: el ADN, o ácido desoxirribonucleico, que actúa como un almacén casi permanente de la información genética, y las proteínas, que ejecutan las órdenes de los genes. Los descubrimientos de proteínas han llevado a avances médicos tales como la insulina sintética, el interferón y los fármacos antitumorales de nueva generación. Y la terapia génica, mediante fragmentos modificados de ADN, ha cosechado resultados en la lucha contra la hemofilia, la ceguera hereditaria y otras enfermedades hasta ahora intratables.

Durante esos progresos médicos se pasó por alto un tercer tipo de biomolécula: el ARN o ácido ribonucleico. Al igual que el ADN, el ARN contiene información genética, pero exhibe una menor estabilidad química que este y tiende a ser degradado por las enzimas del turbulento ambiente citoplasmático.

Aunque desde hace tiempo se sabía que el ARN se hallaba involucrado de un modo u otro en casi todos los procesos celulares, durante la mayor parte de la revolución biomédica se le asignó un papel secundario, a la sombra del ADN y de las proteínas. En los años cincuenta y sesenta, los biólogos pensaban que el ARN desempeñaba funciones auxiliares, como transportar mensajes, coordinar suministros y mantener las células en orden.

Pero una serie de descubrimientos a finales del siglo xx revelaron nuevas formas de ARN que en nada coincidían con su imagen de «humilde asistente doméstico». Al contrario, esas moléculas ejercían un grado de control asombroso sobre el comportamiento del ADN y las proteínas, al intervenir sobre determinadas moléculas para aumentar o reducir su actividad. Mediante la manipulación de este ARN, se podrían desarrollar nuevos tratamientos contra el cáncer, las enfermedades infecciosas y un amplio abanico de trastornos crónicos.

En el último decenio, los investigadores se han afanado en explotar este conocimiento. El ritmo de los descubrimientos se ha acelerado, han surgido decenas de empresas de nueva creación (*start-ups*) para sacar provecho de los nuevos hallazgos y están a punto de aparecer algunos tratamientos prometedores.

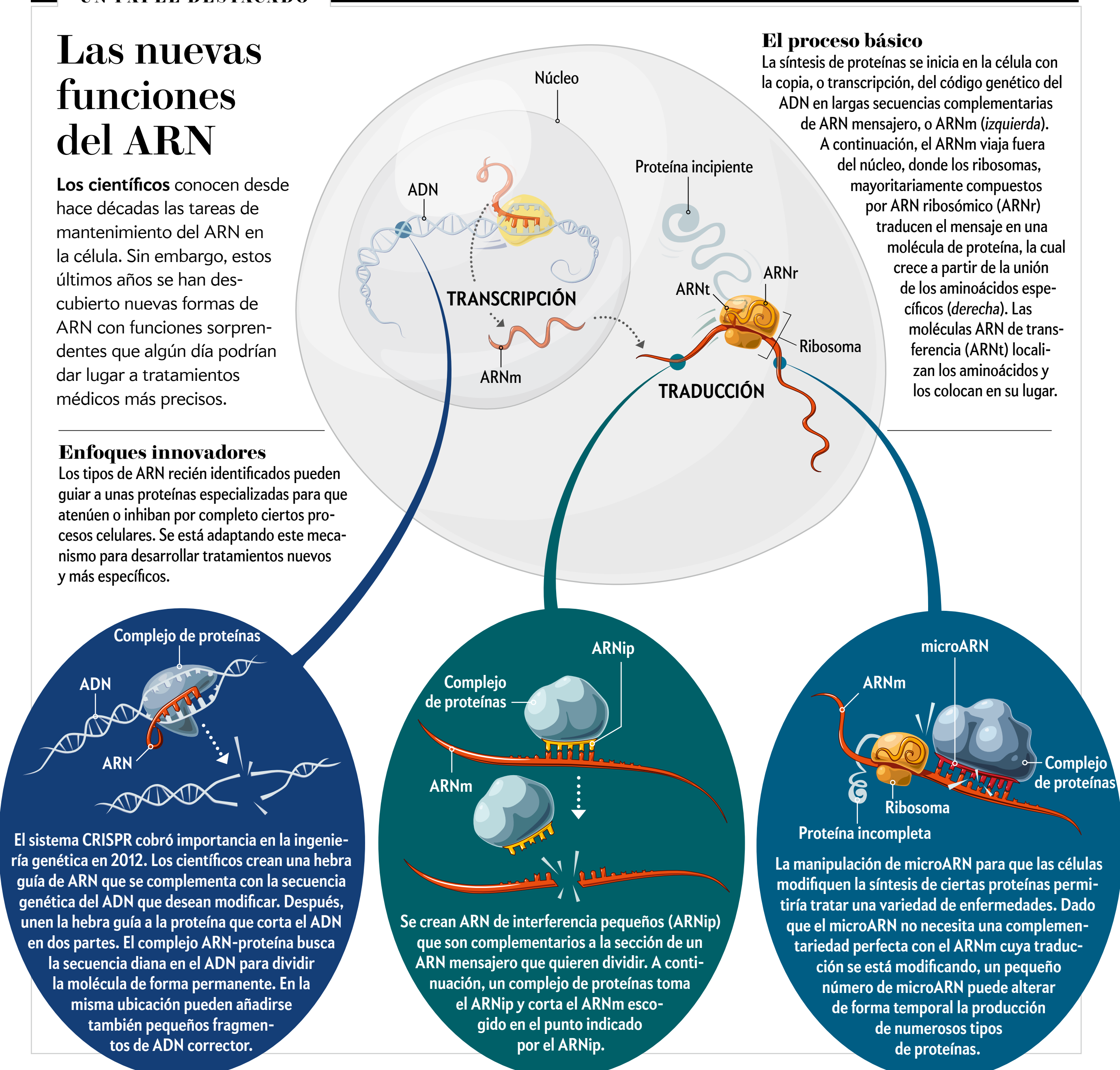
Mientras tanto, la tímida financiación inicial de los proyectos ha crecido hasta convertirse en un torrente de miles de millones de dólares. Entre las empresas recientes, Editas Medicine recibió 43 millones en capital riesgo para su creación

EN SÍNTESIS

Tres de las moléculas complejas más importantes para los organismos son el ADN, el ARN y las proteínas. Durante décadas, se atribuyeron al ADN y a las proteínas los papeles más activos en la célula, mientras que el ARN, aunque importante, prestaría un servicio de apoyo.

Una serie de descubrimientos a finales del siglo xx revelaron varias formas de ARN que desempeñan funciones dinámicas y reguladoras en las células. En concreto, determinan qué proteínas se sintetizan y en qué cantidad, o incluso silencian por completo algunos genes.

Estos últimos avances están permitiendo crear un nuevo mundo de medicamentos experimentales frente a las bacterias, los virus, el cáncer y varios trastornos crónicos. Tales fármacos podrían ofrecer mayor eficacia y precisión que muchos de los disponibles en la actualidad.



a finales de 2013. La compañía está concentrando sus esfuerzos en la última técnica de ARN, conocida como CRISPR. Una compañía algo más antigua, Alnylam Pharmaceuticals, fundada en 2002, recibió 700 millones de dólares el pasado mes de enero para desarrollar, entre otros productos, medicamentos basados en ARN contra enfermedades devastadoras que afectan a la sangre, el hígado y el sistema inmunitario.

La financiación ha llegado en oleadas, comenta Robert MacLeod, de Isis Pharmaceuticals, empresa que ha recaudado casi 3800 millones de dólares desde que se fundó en 1989. Su principal producto, Kynamro, un fármaco basado en ARN, fue aprobado en 2013 por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. para tratar un trastorno genético infrecuente que provoca un mal procesamiento del colesterol, lo que conlleva un alto riesgo de ataque cardíaco y accidente cerebrovascular.

Como en cualquier campo en rápida expansión, ha habido obstáculos y desvíos en el camino, y quizá no todos los hallazgos resistan el paso del tiempo. No obstante, los investigadores rebosan entusiasmo, como si hubieran encontrado un nuevo continente por explorar.

FUNCIÓN DE APOYO

Es fácil entender por qué los biólogos moleculares asignaron un papel principal al ADN o a las proteínas, y no al ARN. Las subunidades del ADN (adenina, timina, citosina y guanina, o A, T, C y G) constituyen el manual básico de instrucciones para dar forma a casi todos los seres vivos del planeta. Y uno de

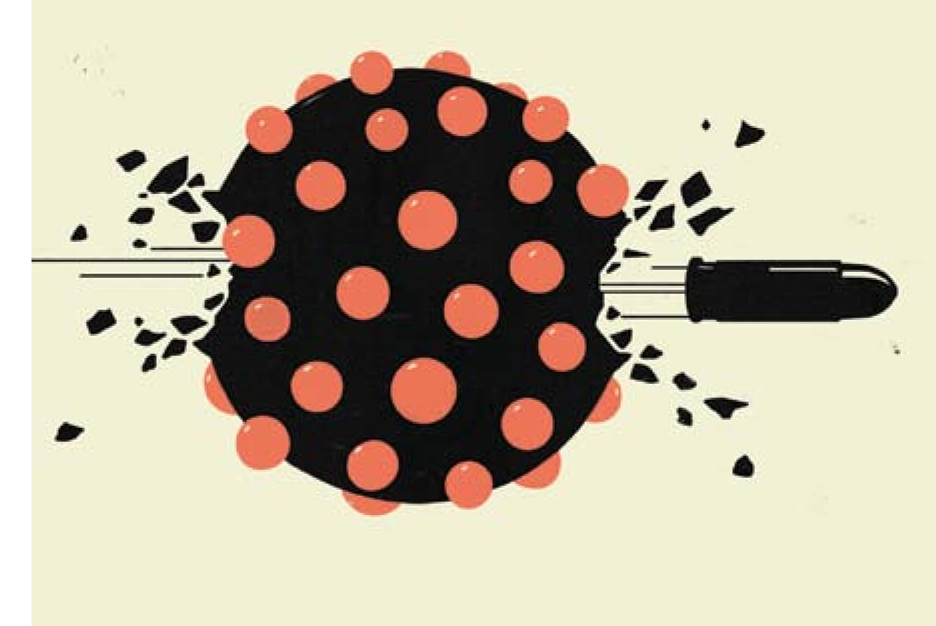
JOSY CONKLIN

los procesos más importantes en que el ADN proporciona directrices (o códigos) es la síntesis de proteínas.

Por su parte, las proteínas aportan a las células una estructura tridimensional y les permiten realizar numerosas tareas; dotan de un aspecto juvenil a la piel y de una fuerza de por vida al corazón. También activan o desactivan el ADN en respuesta a señales ambientales, determinan el consumo de azúcar por las células y regulan la transmisión de impulsos entre las neuronas. La inmensa mayoría de los medicamentos de hoy en día (desde la aspirina hasta el Zoloft) ejercen su efecto al modificar ciertas proteínas, ya sea al suprimir su función o al alterar la cantidad que se sintetiza de ellas.

Aun así, los investigadores no han podido desarrollar sustancias que actúen sobre todas las proteínas que les interesaría modificar. Las soluciones farmacológicas más habituales consisten en moléculas pequeñas que persisten tras ser tragadas y llegar al medio ácido del estómago. Una vez absorbidas por el sistema digestivo, deben unirse a los lugares activos de sus proteínas diana del modo en que una llave encajaría en una cerradura. Pero hay ciertos grupos de proteínas en las que tal estrategia no funciona. Ello se debe a que esconden sus centros activos en canales muy estrechos, o ni siquiera contienen un centro activo porque forman parte del esqueleto interno de la célula, un rasgo que las hace insensibles a los fármacos, según MacLeod.

Este obstáculo es el que los nuevos medicamentos basados en ARN pretenden superar, aunque el modo en que podrían hacerlo no se ha demostrado hasta hace poco. Se sabe desde hace tiempo que el ARN funciona como un intermediario que copia o transcribe las instrucciones del ADN en una secuencia complementaria (por ejemplo, al hacer corresponder una C con una G) y, a continuación, traduce este código en proteínas tridimensionales. El llamado ARN mensajero (ARNm), que se genera en el núcleo, viaja hacia el citoplasma, donde los ribosomas y el ARN de transferencia (ARNt) operan de forma conjunta para leer el mensaje y unir los aminoácidos (compuestos nitrogenados) en largas cadenas que se convierten en proteínas. Pero el ARN ejerce muchas más funciones.



UNA NUEVA ARMA FRENTE A LA HEPATITIS C

Atacar cierto microARN presente en las células hepáticas podría ayudar a vencer la infección

Christine Gorman

Hace veinticinco años, nadie había oído hablar del virus de la hepatitis C. En la actualidad, es una de las principales causas de cáncer hepático y una razón importante por la que las personas se someten a trasplantes de hígado. En todo el mundo ocasiona la muerte de unas 350.000 personas al año; en los EE.UU., hoy fallecen más personas por hepatitis C que por sida.

La infección se puede curar, aunque con efectos secundarios debilitantes. El tratamiento estándar con interferón y ribavirina provoca fiebre, cefaleas, cansancio, depresión y anemia. La terapia puede durar hasta once meses y vence la enfer-

TAREAS FUNDAMENTALES

El trabajo preliminar que puso de manifiesto la función primordial del ARN data de 1993, con la identificación de los primeros microARN. Estas secuencias de ARN inusualmente cortas se unen a las hebras de ARNm y evitan que los ribosomas procedan al ensamblaje de una proteína. En apariencia, las células utilizan los microARN para coordinar la síntesis de numerosas proteínas, en especial durante el desarrollo inicial del organismo. Cinco años más tarde, se logró otro gran avance cuando se demostró que diferentes moléculas cortas de ARN silenciaban la traducción de un gen en una proteína al cortar el ARNm. Tal descubrimiento histórico fue merecedor de un premio Nobel en 2006.

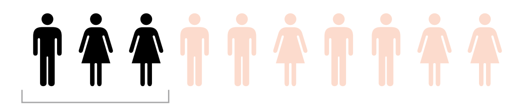
A esas alturas, todo el mundo, no solo los especialistas en ARN, mostraba interés en emplear esta molécula antes menospreciada para manipular la síntesis de proteínas. El mecanismo de rotura del ARNm mediante moléculas cortas de ARN se denominó interferencia de ARN (iARN), y a las moléculas, ARN de interferencia pequeños (ARNip). Mientras tanto, numerosos científicos se dieron cuenta de que se podría actuar sobre las proteínas insensibles a los fármacos si se intervenía antes de



medad entre un 50 y un 70 por ciento de los casos. La adición reciente de inhibidores de la proteasa, una clase de medicamentos que se usó por primera vez frente al VIH, ha mejorado el porcentaje de curación y ha reducido el tiempo de tratamiento. Por desgracia, los fármacos nuevos solo funcionan frente al tipo de hepatitis C más frecuente en Norteamérica, Europa y Japón, por lo que no resultan igual de eficaces en todo el mundo.

que un virus de la hepatitis C penetra en la célula, se une a miR-122, lo que garantiza la formación de múltiples copias víricas. Por tanto, al inhibir la actividad de miR-122, se impide también la replicación del virus.

El principal efecto secundario del miravirsen fue el enrojecimiento de la piel en el lugar de la inyección, que terminó por desaparecer. Debido a que el tratamiento se dirige contra un componente de las células huésped,



Al menos el 30 por ciento
de las personas con hepatitis C no se curan después de una primera tanda de tratamiento estándar

Los medicamentos basados en ARN pueden mejorar esta perspectiva. En 2013, se demostró que al atacar un microARN de las células hepáticas con un fármaco experimental llamado miravirsen, la cantidad de virus de la hepatitis C disminuía en la mayoría de los pacientes, en algunos casos hasta niveles indetectables. El fármaco consiste en una secuencia corta de ADN cuyas «letras» son complementarias a las presentes en el microARN, lo que permite al medicamento alojarse de forma precisa en su objetivo.

El microARN en cuestión, conocido como miR-122, cumple una función clave en la producción de numerosas proteínas hepáticas. No obstante, a diferencia de muchos microARN, parece incrementar su síntesis en lugar de suprimirla. Una vez

y no contra una de las proteínas víricas (que es como funcionan los inhibidores de la proteasa), debería resultar eficaz frente a todas las cepas de hepatitis C.

Aunque la intervención se diseñó para que durase solo cuatro semanas, por lo que en algún momento todos los pacientes tratados recaían, hay motivos para creer que un tratamiento más prolongado ofrecerá mejores resultados. «La idea es que si se bloquea la replicación del virus durante el tiempo suficiente, se pueda curar la enfermedad», apunta Harry L. A. Janssen, investigador principal en el Instituto de Investigación General de Toronto y coautor del estudio sobre el miravirsen, publicado en el *New England Journal of Medicine*. Otras pruebas se hallan en curso.

su formación; en concreto, en el ARN, durante el proceso de síntesis proteica.

En la base de datos de ensayos clínicos del Gobierno de EE.UU. se han registrado hasta la fecha más de 200 estudios experimentales con ARNip o microARN para el diagnóstico o tratamiento de todo tipo de patologías, desde el autismo hasta el cáncer de piel. Entre las terapias más prometedoras se hallan las que combaten el virus del Ébola (un patógeno extremadamente mortal que los expertos en terrorismo temen que pueda convertirse en un arma biológica) y la hepatitis C, que ha provocado infecciones crónicas en casi 150 millones de personas en todo el mundo y es una causa importante de cáncer hepático.

EL SIGUIENTE PASO

Mientras que los medicamentos basados en ARNip o microARN se hallan cerca de su aplicación clínica, otra generación de posibles fármacos está al acecho. Estos futuros medicamentos operarán todavía antes, en la propia molécula de ADN. Una de las estrategias se basa en las secuencias CRISPR, que se encuentran en el ADN de numerosos organismos unicelulares y que se describieron con entusiasmo en *Science* como la «fiebre de las CRISPR». La otra, que depende de la existencia de moléculas conocidas como ARN largos no codificantes (ARNlnc) todavía se enfrenta al escepticismo de algunos.

CRISPR corresponde a las siglas en inglés de repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente espaciadas. Son secuencias que se repiten con poca frecuencia en el ADN y que se hallan en bacterias y arqueas (organismos parecidos a las bacterias). Estas secuencias peculiares, a su vez, interactúan con las proteínas asociadas a CRISPR, conocidas como Cas. Las CRISPR y varias proteínas Cas forman juntas una defensa microbiana frente a los virus.

Las proteínas tienen una misión: cortar el ADN en dos. Para ello necesitan ser guiadas hacia las secuencias específicas de ADN vírico mediante hebras complementarias de ARN. Las células toman este ARN del virus invasor, convirtiéndolo en un agente doble que guía las proteínas Cas al punto exacto donde deben cortar.

Aunque los elementos CRISPR se observaron por primera vez en bacterias en 1987, no fue hasta 2012 cuando los científicos empezaron a adaptar el sistema a una amplia gama de tejidos animales, incluidos los humanos. Mediante la creación de hebras guía de ARN, se propusieron dirigir las proteínas Cas para que cortasen moléculas de ADN en el núcleo, en localizaciones concretas. En esencia, habían convertido el mecanismo bacteriano de defensa en un instrumento de precisión para la edición de genes.

Esta técnica tan específica podría revolucionar, más tarde que pronto, la terapia génica. En la actualidad se inyecta, con escasa precisión, ADN corrector en pacientes con genes defectuosos, con la esperanza de que parte del material genético se las arregle para empezar a trabajar en el lugar adecuado. La técnica CRISPR/Cas, una vez desarrollada por completo, podría cambiar esta situación, ya que permitiría elegir de forma exacta dónde debe modificarse el ADN del paciente. «Sin duda, el próximo año veremos un buen número de ensayos de terapia génica que emplearán la técnica», augura George M. Church, profesor de genética de la Escuela de Medicina de Harvard,

LA DERROTA DE UN PATÓGENO MALIGNO

Un tratamiento basado en el ARN puede detener el avance del virus del Ébola

Ferris Jabr



En un primer momento, las personas infectadas con el virus del Ébola parecen aquejados de gripe, con fiebre, escalofríos y dolores musculares. A continuación, empiezan las hemorragias. A medida que el virus secuestra las células de todo el organismo para generar copias de sí mismo, invade y daña el hígado, los pulmones, el bazo y los vasos sanguíneos. En unos días, los órganos empiezan a fallar y muchos pacientes entran en coma. Algunos brotes, principalmente en África Central y Occidental, han matado hasta al 90 por ciento de las personas infectadas.

Ese pronóstico aterrador puede estar a punto de cambiar. Mediante ARN de interferencia pequeños (ARNip) Thomas W. Geisbert, ahora en el Centro Médico de la Universidad de Texas, en Galveston, y sus colaboradores han ideado un tratamiento muy prometedor que ha salvado la vida de seis monos infectados con el virus. Según se informó el pasado mes de enero, la intervención ha superado la primera prueba de seguridad en un humano voluntario no infectado. Uno de los colaboradores de Geisbert, Ian Maclachlan, de Tekmira Pharmaceuticals en Burnaby (Columbia Británica), y su equipo han recibido una subvención de 140 millones de dólares por parte del Departamento de Defensa de los EE.UU. para seguir desarrollando el tratamiento.

Se ha diseñado así un ARNip para evitar que el virus del Ébola sintetice cierta proteína que necesita para replicarse. «En teoría, si se anula esa proteína, se anula todo», comenta Geisbert. También se ha creado otro ARNip que impide la fabricación de una segunda proteína que el virus utiliza para debilitar el sistema inmunitario de la persona infectada. No hay peligro de que el ARNip interfiera con las tareas habituales de la célula porque las proteínas víricas a las que afecta no existen en las células de los humanos ni de otros mamíferos.

Maclachlan y sus colaboradores encapsularon el ARNip artificial en pequeñas burbujas de grasa que pueden ser transportadas a través de las membranas celulares. A continuación, inyectaron la preparación en diversos macacos *rhesus* que habían sido infectados con el virus del Ébola hacía menos de una hora. En uno de los estudios, sobrevivieron dos de los tres monos a los que se les habían administrado cuatro dosis en la primera semana después de la exposición. En un segundo estudio diseñado para probar la efectividad de una dosis mayor, sobrevivieron los cuatro monos que recibieron siete inyecciones de ARNip. Las pruebas revelaron que los animales tratados presentaban muchas menos moléculas del virus en la sangre de lo que es habitual en un animal infectado. Los macacos toleraron bien las inyecciones de ARNip, y aquellos que sobrevivieron seguían estando sanos 30 días después.

El estudio fue un hito, apunta Gary Kobinger, de la Universidad de Manitoba, que está trabajando en un tratamiento diferente contra el Ébola basado en anticuerpos. Kobinger cree que Geisbert y su equipo están liderando el esfuerzo hacia el desarrollo clínico.

Los brotes, principalmente en África Central y Occidental, han terminado con la vida de hasta el **90 por ciento de las personas infectadas**

Ferris Jabr *es redactor asociado en* Scientific American.



cofundador de Editas y asesor científico de *Scientific American.* «Es un método ágil y sencillo», añade. «Se obtiene el material de las bacterias con cambios mínimos. Casi todos los ARN guía que se desean obtener se dirigen a un lugar donde funcionan.»

Church espera que Editas empiece pronto los ensayos clínicos, después de terminar los estudios con animales. Otras empresas recién creadas y centradas en las CRISPR son Caribou Biosciences y Egenesis.

Por último, el más controvertido de los últimos descubrimientos del ARN atañe a los ARNlnc. Descritos por primera vez en 2002, estas secuencias de ARN inusualmente largas se originan en el núcleo y a primera vista recuerdan al ARNm, excepto en que carecen de ciertas secuencias o letras necesarias para iniciar el proceso de traducción.

¿Qué se propone la célula con todas estas moléculas de ARN adicionales? Algunas de ellas, sin duda, son el resultado de la transcripción de versiones anteriores de genes que ahora están alterados y ya no son funcionales. Uno de los descubrimientos más sorprendentes de la revolución genética es que casi todo el ADN que se halla en el núcleo se transcribe, no solo las partes que codifican proteínas. Otras secuencias tal vez correspondan a ecos de ataques antiguos de ciertos tipos de virus que incorporaron su material genético en el ADN de una célula, lo que permitió que se transmitiera a través de las generaciones posteriores.

Pero ¿y si alguno de los ARNlnc representara un mecanismo insospechado para regular la expresión de los genes? Este no conllevaría mutaciones potencialmente peligrosas en el ADN y no dependería de las proteínas para desempeñar funciones destacadas. Piénsese en el ADN como si estuviese plegado igual que una figura de papiroflexia, comenta el investigador en el ARN John Rinn, de la Universidad Harvard. Con dos trozos de papel idénticos se podría construir un avión o una grulla; el ARNlnc hace, de alguna manera, que el ADN se asegure de que los pasos se dan en el orden correcto. Así como un error de plegamiento en la figura de papel podría dejar a una grulla sin alas, el exceso de ARN no codificante podría desencadenar el crecimiento de un tumor sin haberse producido ni una sola mutación en los genes de la célula.

Otra posibilidad que se está investigando es si las moléculas de ARNlnc se adhieren a las diferentes partes de una molécula de ADN y cambian la estructura tridimensional de esta, con lo que facilitan o impiden su exposición a la actividad de otras moléculas.

Una serie de otros ARN no codificantes se hallan en diversas etapas de estudio, bien para confirmar que se trata de reguladores genéticos importantes o que carecen de función genética. Una de las dificultades de estudiar los ARN no codificantes radica en el hecho de que no dan lugar a proteínas, lo que hace más complicado demostrar su papel relevante. «Sin embargo, el campo todavía está en sus inicios» señala John Mattick, investigador prominente del ARN no codificante y director del Instituto Garvan de Investigación Médica de Australia.

Además de la amplia gama de compuestos de ARN que se están diseñando y ensayando, ha empezado a destacarse la característica tal vez más atractiva de la molécula: su simplicidad. A diferencia de las proteínas, cuya estructura tridimensional debe caracterizarse antes de poder desarrollar nuevos medicamentos, el ARN consiste básicamente en una secuencia bidimensional (dejando de lado, por el momento, algunas de las formas en las que las moléculas de ARN se pliegan). «Un problema de tres dimensiones, donde una molécula pequeña debe encajar en una proteína mediante un ajuste de tipo llave-cerradura, se reduce a otro de dos dimensiones y lineal», comenta MacLeod, de Isis. Gracias al Proyecto Genoma Humano, los investigadores ya conocen las secuencias más importantes del genoma. Todo lo que necesitan es sintetizar la hebra de ARN complementaria y podrán recoger el fruto de sus esfuerzos.

La tímida financiación inicial de los proyectos ha crecido hasta convertirse en un torrente de millones de dólares. Una empresa de reciente creación recibió hace poco 43 millones y una compañía algo más antigua obtuvo 700 millones para desarrollar sus medicamentos basados en ARN

Por supuesto, hallar la manera de poner en práctica la teoría exige continuar en el empeño. De momento, los resultados obtenidos son esperanzadores y ofrecen aliento para seguir avanzando.

***Christine Gorman* y *Dina Fine Maron* son redactora principal y redactora asociada, respectivamente, de Scientific American.**

PARA SABER MÁS

Small silencing RNAs: An expanding universe. Megha Ghildiyal y Phillip D. Zamore en *Nature Reviews Genetics*, vol. 10, págs. 94-108, febrero de 2009. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2724769**

Developing microRNA therapeutics. Eva van Rooij et al. en *Circulation Research*, vol. 110, n.º 3, págs. 496-507, febrero de 2012. **http://circres.ahajournals.org/content/110/3/496.long**

Control of gene expression by CRISPR-Cas systems. David Bikard y Luciano A. Marraffini en *F1000 Prime Reports*, vol. 5, art. 47, noviembre de 2013. **http://f1000.com/prime/reports/b/5/47**

EN NUESTRO ARCHIVO

Interferencia de ARN. N. C. Lau y D. P. Bartel en *IyC*, octubre de 2003.

MicroARN. C. Llave en *IyC*, julio de 2004.

Viaje al interior del genoma. Stephen S. Hall en *IyC*, diciembre de 2012.

René Bally es director de investigación del Laboratorio de Ecología Microbiana, un centro mixto de la Universidad de Lyon y el Centro Nacional de la Investigación Científica de Francia.

Robin Duponnois es director de investigación del Laboratorio de Simbiosis Tropicales y Mediterráneas, del Instituto de Investigación para el Desarrollo de Francia.



MEDIOAMBIENTE

La Gran Muralla Verde

Una iniciativa que pretende implantar una banda de vegetación que orle el Sahara a fin de contener el avance del desierto

René Bally y Robin Duponnois

LA DESERTIFICACIÓN SE CARACTERIZA POR UN EMPOBRECIMIENTO DRÁSTICO DE LOS SUELOS, A MEnudo desencadenado por la sobreexplotación agrícola. Tiene como consecuencia el abandono de las tierras cultivadas, que el viento, la lluvia y otros fenómenos naturales acaban por convertir en estériles al suprimir la capa superficial fértil.

Según el Comité Científico Francés de la Desertificación, cada año diez millones de hectáreas de tierras labrantías de todo el mundo se transforman en desierto. El fenómeno amenaza una parte de África, Sudamérica y Asia. En los países ricos, como Australia, los agricultores disponen de medios para contener el avance del desierto, en concreto, mediante la irrigación controlada. El proceso afecta a un 70 por ciento de las tierras áridas o semiáridas (que representan el 41 por ciento de la superficie de los continentes), y 480 millones de personas corren el riesgo de verse obligadas a abandonar sus tierras o de cambiar de modo de vida.

África es un continente especialmente perjudicado. Según algunos expertos, en los últimos cincuenta años ha perdido 650.000 kilómetros cuadrados de tierras productivas, una superficie equiparable a la de la península ibérica. Desde principios del siglo xx, el desierto del Sahara ha progresado hacia el sur, en algunos lugares, hasta 250 kilómetros. Desde entonces, la lucha contra la desertificación constituye una prioridad para la Unión Africana, que la trata en el programa NEPAD (Nueva Asociación para el Desarrollo de África), y para la Comunidad de los Estados Sahelosaharianos.

Por desgracia, estas organizaciones no han conseguido detener el fenómeno, por lo que es necesaria una nueva estrategia global. En este contexto, en 2005 se propuso la Iniciativa Africana de la Gran Muralla Verde (IAGMV); se trata de edificar un baluarte vegetal, de 15 kilómetros de ancho, que atravesaría el continente y detendría el avance del Sahara hacia el sur. Esta defensa transcontinental uniría Senegal con Etiopía y recorrería una distancia de 7000 kilómetros a través de once países. Estaría compuesta por bosques (se prevén plantaciones masivas de árboles), pero también por campos de cultivo. Una gran parte del proyecto consiste en evitar el abandono de las tierras agrícolas que ya existen y que se ven amenazadas por la desertificación, mediante la mejora de su productividad. Se

EN SÍNTESIS

En todo el mundo la desertificación amenaza a 480 millones de personas, cuyas tierras agrícolas se empobrecen.

Para frenar el fenómeno, en África se ha propuesto crear la Gran Muralla Verde, una banda de bosques y cultivos que debe orlar el Sahara.

En el seno de dicha franja se busca aumentar la productividad de los sistemas agrícolas y evitar el abandono de las tierras.

Solo Senegal ha puesto en marcha la Gran Muralla Verde, pero se prevé que en 2014 se inicien proyectos en Mali y Burkina Faso.



EL TRAZADO PREVISTO de la Gran Muralla Verde (*verde claro*) atraviesa África de este a oeste y pasa por once países. Alcanza 7000 kilómetros de longitud y 15 kilómetros de anchura.

busca desarrollar y difundir nuevas técnicas compatibles con las prácticas y conocimientos tradicionales. A continuación, después de una breve presentación de las acciones que han precedido a esta iniciativa, describiremos con mayor detalle el proyecto de la Gran Muralla Verde.

INTENTOS INFRUCTUOSOS

A lo largo de varias décadas, la mayoría de los países del Sahel han realizado esfuerzos técnicos, financieros e institucionales importantes. Su objetivo era garantizar la seguridad alimentaria de la población (así como la seguridad energética, mediante la producción de leña) y mejorar las condiciones de vida de los agricultores, al tiempo que se conservaba la biodiversidad. A tal fin, se han diversificado los cultivos agrícolas, se han introducido cuencas de retención de aguas pluviales y se han emprendido acciones contra la desertificación y la degradación de los suelos labrantíos. Entre otras medidas, se han construido muretes de tierra en forma de media luna sobre las pendientes erosionadas por las lluvias violentas. Tales estructuras retienen el suelo y constituyen depósitos de agua; en ellas se aplican con preferencia los fertilizantes, como el estiércol de los animales, con el fin de no dispersar los recursos.

Asimismo, se han fomentado determinadas prácticas agrícolas tradicionales, entre ellas el acolchado, o *mulching* (recubrimiento del suelo mediante restos orgánicos, como los residuos agrícolas), o bien el *zaï*, o *tassa*. Esta práctica consiste en la excavación en el campo de cultivo de micropozos de un metro de diámetro donde se siembran las semillas. En estas zonas, donde se concentra el agua de lluvia, se añaden abonos orgánicos. Al estimular la actividad biológica en los micropozos, el *zaï* permite reconstituir las propiedades hidrofísicas de los suelos degradados (estabilidad, porosidad) y optimizar la productividad del agrosistema. Pero necesita un importante laboreo del suelo, por lo que solo resulta interesante cuando las precipitaciones son escasas, inferiores a los 300 milímetros anuales.

A pesar de su promoción, estas prácticas están todavía poco extendidas, sobre todo debido a la falta de recursos orgánicos. En concreto, en las regiones áridas los residuos agrícolas se utilizan sobre todo como forraje.

En conjunto, las diversas iniciativas no han cosechado los resultados esperados. Hay numerosos impedimentos, en especial financieros, que limitan el desarrollo de la mayoría de los países del Sahel. Tal constatación ha conducido a la adopción de nuevos proyectos, como el de la Gran Muralla Verde. Este se planteó en ocasión de la séptima Cumbre de Jefes de Estado y de Gobierno de los Estados Sahelosaharianos, celebrada en junio de 2005 en Ouagadougou, Burkina Faso, y fue aprobado dos años después por la Unión Africana. Al principio se presentó como una simple banda forestal, de 15 kilómetros de ancho, que atravesaría de un lado a otro el continente. El proyecto fue recibido con un cierto escepticismo, pues la idea de la lucha contra la desertificación contradecía varios conocimientos científicos y técnicos.

PROYECTOS VERDES EN ARGELIA Y CHINA

En efecto, algunas experiencias previas de plantaciones arbóreas continuas habían topado con varios obstáculos. El proyecto argelino de la Empalizada Verde, iniciado en los años setenta del siglo xx, pretendía instalar una barrera vegetal para detener el avance del desierto hacia el norte. Había de tener una anchura de entre 20 y 30 kilómetros y extenderse sobre tres millones de hectáreas, desde la frontera oriental del país hasta su frontera occidental. Pero las primeras plantaciones, que se hicieron solo con pinos carrascos (*Pinus halepensis*), fueron destruidas en gran parte por la oruga procesionaria. En general, los monocultivos son más vulnerables a las infecciones y a los insectos. Otros factores contribuyeron al fracaso, como la presión del pastoralismo: los rebaños que atravesaban las plantaciones destruían los jóvenes pimpollos. En consecuencia, hasta ahora solo se han reforestado 160.000 hectáreas, es decir, el cinco por ciento del objetivo inicial. La Empalizada Verde argelina sigue avanzando, pero ahora se basa en diversas especies de árboles en lugar de una sola.

En Asia se desarrolla un proyecto similar, la Gran Muralla Verde de China. El objetivo consiste en rodear el desierto de





VIVERO DE ACACIAS en la región de Tessékéré, en el norte de Senegal (*izquierda*). Los árboles se cultivan en tiestos durante cuatro meses, antes de plantarlos en el medio natural (*derecha*).

Gobi con un cinturón vegetal, con el fin de detener su avance y de proteger de los vientos de arena a las ciudades adyacentes. Al igual que en Argelia, en un principio se utilizó una sola especie (un árbol exótico de Australia), pero después las plantaciones se diversificaron. El proyecto, iniciado en 1978, no terminará hasta dentro de varias décadas; su coste previsto es de unos mil millones de euros. En la actualidad, tras haberse implantado un 18 por ciento del cinturón, representa el mayor bosque artificial del mundo.



LOS REBAÑOS DE ANIMALES DOMÉSTICOS suponen una amenaza para las plantaciones, pues consumen los brotes jóvenes. Tener en cuenta las rivalidades entre ganaderos y agricultores resulta esencial para el éxito de la Gran Muralla Verde.

UN PLAN INTEGRAL

Sobre la base de estas experiencias, el proyecto de la Gran Muralla Verde no pretende introducir un monocultivo continuo, sino que persigue el desarrollo integral de una banda de territorio. Se contempla la plantación de especies vegetales de interés económico y adaptadas a la sequía, así como la introducción de sistemas agroforestales (asociaciones de árboles y de cultivos). Se incluye también la ejecución de cuencas de retención, el desarrollo de otras actividades económicas (artesanía, escultura de la madera) y la mejora de la gobernanza local y de los servicios socioeconómicos.

La difusión de buenas prácticas se apoya en una red de Polos Rurales de Desarrollo (PRD), compuestos por representantes del proyecto (funcionarios, ingenieros y otros) que organizan actividades de formación y talleres. De esta manera, se espera detener la marcha de la población y el consiguiente abandono de las tierras que lleva a la desertificación. Según un informe de 2008 del Observatorio del Sahara y del Sahel (organización internacional que tiene entre sus principales objetivos luchar contra la desertificación), «la Gran Muralla Verde no se concibe como un muro de árboles que se extiende de una parte a otra del desierto, sino como un conjunto de acciones e intervenciones multisectoriales de conservación y protección de los recursos naturales cuyo fin es luchar contra la pobreza».

Las plantaciones de árboles son, no obstante, un elemento esencial del plan. El árbol desempeña un papel clave en el buen funcionamiento de los suelos. Resulta fundamental para los movimientos hídricos (del agua del suelo) y los principales ciclos geoquímicos (la circulación de nutrientes, como el carbono, el fósforo y el nitrógeno) que rigen la fertilidad de los suelos. Una acacia de dos metros de altura, por ejemplo, hunde sus raíces hasta cuatro metros de profundidad, lo que provoca el ascenso del agua. Esta se transfiere a la atmósfera mediante el fenómeno de la evapotranspiración. Asimismo, las raíces absorben los nutrientes y los utilizan para producir las hojas, las cuales fertilizan el suelo cuando caen. El guano que distribuyen las aves que se posan sobre los árboles constituye otro abono. Además, las especies arbóreas favorecen el desarrollo de numerosos microorganismos útiles para los cultivos.

Para la Gran Muralla Verde se han elegido tres especies locales: la acacia senegal o árbol de la goma arábiga (*Acacia senegal*), el datilero del desierto (*Balanites aegyptiaca*) y el azufaifo o ciruelo indio (*Ziziphus mauritiana*). La goma de la acacia se utiliza sobre todo para la alimentación, como material de construcción y como aditivo en la industria textil. El datilero del desierto tiene asimismo múltiples usos: farmacológicos (las hojas y la corteza se aprovechan para tratar la diarrea), alimentarios (los frutos son comestibles y proporcionan jugos y crema). En cuanto al azufaifo, produce frutos comestibles.

Hasta el momento, Senegal es el único país que ha iniciado la construcción de la Gran Muralla Verde. Ha creado viveros forestales, donde se cultivan los árboles en tiestos durante cuatro meses antes de plantarlos en la naturaleza. Entre 2008 y 2010 se produjeron cerca de ocho millones de plantones, se plantaron más de 16.000 hectáreas de bosque y se excavaron más de 4500 kilómetros de cortafuegos (no se dispone de los datos posteriores a 2010, pero el proyecto ha continuado a un ritmo similar). Además, se han instalado huertos alrededor de las aldeas, a fin de mejorar los ingresos de las poblaciones locales. Allí las mujeres culti-

La Gran Muralla Verde en cifras:

Senegal avanza con rapidez en la instauración de la Gran Muralla Verde. Entre 2008 y 2010 se han creado:

13	viveros
7.750.000	plantones de árboles
16.225	hectáreas de plantaciones forestales
4540	kilómetros de cortafuegos





LA PRÁCTICA TRADICIONAL llamada *zaï* en Burkina Faso y Senegal, y *tassa* en Níger, consiste en excavar pequeñas cuencas o micropozos en los que se concentran el agua y los abonos. Se podría combinar con las técnicas promovidas en el marco de la Gran Muralla Verde.

van productos de alto valor añadido. Ha costado mucho tiempo poner en marcha el proyecto, sobre todo a nivel institucional, y los acontecimientos recientes, como la guerra en Mali, lo han frenado, pero deberá acelerarse en los próximos años.

Otra dificultad es que los árboles no alcanzan la madurez hasta transcurridos 20 o 30 años y no empiezan a ejercer un efecto en los ecosistemas hasta diez años después de su plantación (recuérdese que los primeros árboles de la Gran Muralla Verde se introdujeron en 2008). Por ello, la población local debe protegerlos y cuidarlos durante su crecimiento. Numerosas investigaciones pretenden acelerar este crecimiento, como se comenta más adelante.

En 2009, el Instituto de Ecología y Medioambiente del Centro Nacional de Investigación Científica de Francia (CRNS) creó un Observatorio de la Relación entre Hombre y Entorno en Téssékéré, en el nordeste de Senegal, en colaboración con numerosos organismos. En él participan varios laboratorios del CNRS y del Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), así como universidades de Senegal y de Burkina Faso. El observatorio realiza estudios en distintos ámbitos, entre ellos biológicos, ecológicos, culturales, sociales, sanitarios y climáticos, con el fin de analizar y optimizar la puesta en marcha de la Gran Muralla Verde.

En investigación forestal, por ejemplo, se busca mejorar la producción de plantones en los viveros mediante el estudio de semillas de procedencias diversas (algunas crecen más deprisa y dan lugar a árboles mayores, que a su vez producen más semillas), de sustratos diferentes (mezclas diversas de arena y de materia orgánica) y de recipientes variados (la forma y el volumen del tiesto influyen sobre el crecimiento del árbol). De este modo, hemos patentado una técnica que consiste en reducir a polvo termiteros inactivos para mezclarlo con la tierra; esta fuente de materia orgánica favorece el crecimiento de los árboles.

Brasil espera inspirarse en algunos proyectos de la Gran Muralla Verde para luchar contra la desertificación que amenaza las regiones áridas del nordeste del país

GESTIONAR LA RIVALIDAD

Otro ámbito clave de la investigación hace referencia a la modelización de los sistemas socioecológicos. La gestión de las rivalidades entre ganaderos y agricultores constituye uno de los parámetros críticos para el éxito de la Gran Muralla Verde, como ha demostrado el ejemplo de Argelia. Se han aplicado diversas soluciones para que estos enfrentamientos no sean redhibitorios. Entre otras acciones, se han preparado corredores para el paso de los rebaños y se han adaptado los períodos de trashumancia con el fin de no perturbar los cultivos.

En el ámbito sanitario, se vigila que la instalación de grandes depósitos de agua no favorezca una pululación de insectos vectores de enfermedades en las aldeas vecinas. En términos de biodiversidad, existe un programa para censar las especies de aves actuales y para seguir su evolución a medida que la Gran Muralla Verde avance y los paisajes se transformen. También se pretende evaluar el posible impacto de la muralla sobre el clima.

Numerosos estudios se centran en los microorganismos presentes de forma natural en los suelos, ya que podrían ofrecer una valiosa ayuda en la implantación de la Gran Muralla Verde. Algunos favorecen la absorción de nutrientes por las plantas, mientras que otros neutralizan los patógenos o los parásitos. En este ámbito, hay datos potencialmente útiles obtenidos en el laboratorio hace décadas que nunca se han explotado a gran escala. Uno de los objetivos de la estructura constituida por los Polos Rurales de Desarrollo y el Observatorio de la Relación entre Hombre y Entorno es transferir a los agricultores los conocimientos científicos adquiridos. A continuación examinaremos el ejemplo de los hongos micorrícicos, que favorecen la nutrición de las plantas cultivadas, y el de los bioplaguicidas, que permiten combatir las plantas fitoparásitas del género *Striga*.

HONGOS PARA REHABILITAR LOS SUELOS

Los hongos micorrícicos son organismos microscópicos del suelo muy vulnerables a la desertificación. Viven en simbiosis con las raíces de determinadas plantas. Se trata de elementos clave para el funcionamiento edáfico, sobre todo en los medios áridos y semiáridos. Intervienen en los principales ciclos biogeoquímicos que aseguran la fertilidad del suelo, como los del fósforo, el nitrógeno y el carbono. La simbiosis con las micorrizas acelera el crecimiento de la planta, ya que los hongos le proporcionan nutrientes. Además, fabrican sustancias tóxicas para los patógenos.

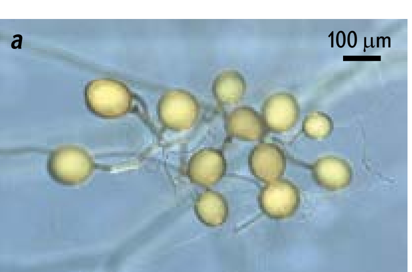
Durante mucho tiempo se consideró que el efecto del hongo sobre el

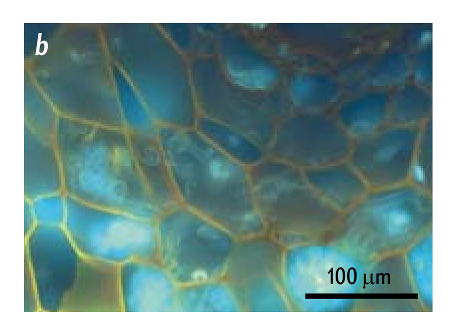
desarrollo de la planta se debía únicamente a las interacciones de los dos componentes de la simbiosis (la planta y el hongo). En la actualidad, se sabe que tal asociación modifica el exudado radicular (un líquido excretado por las raíces), el cual influye sobre la abundancia y la diversidad de otros organismos de la microbiota edáfica. En la proximidad de las raíces, y también en el interior de las células vegetales, se desarrolla una población microbiana específica, la micorrizosfera. En ella se hallan bacterias fijadoras de nitrógeno, en especial del género *Azospirillum*, que establecen endosimbiosis (simbiosis en las que uno de los dos organismos se encuentra en el interior del otro) con las raíces de la planta y favorecen su crecimiento. Entre los vegetales que presentan este mecanismo se hallan las leguminosas (tréboles, habas, lentejas, etc.) o determinados árboles, como los alisos.

Las prácticas agrícolas que promuevan las simbiosis micorrícicas contribuirían a la gestión sostenible de las tierras, pues optimizarían el crecimiento de las plantas sin empobrecer los suelos. Permitirían resolver una aparente paradoja: la carencia de fósforo. Pese a que este elemento abunda en el suelo de estas regiones, los vegetales no pueden asimilarlo en suficiente cantidad (lo que supone uno de los principales factores limitantes para su crecimiento). El problema radica en que se halla sobre todo en forma de complejos químicos insolubles, tales como el fosfato de aluminio o el fosfato de hierro, que las plantas no pueden aprovechar. Pero los hongos micorrícicos pueden hacerlo, gracias a diversos mecanismos. En concreto, acidifican el suelo liberando protones (H^+) o ácidos orgánicos, lo que les permite disolver los complejos químicos y extraer de ellos el fósforo. A continuación lo trasladan a la planta, a través de sus largos filamentos que penetran en las células vegetales.

Varias técnicas agrícolas sencillas se sirven de este mecanismo, pero por desgracia se hallan poco extendidas. Una de ellas se basa en la introducción de plantas hipermicotrofas, como las leguminosas, que establecen fácilmente la simbiosis y favorecen la propagación del hongo en el suelo. El suelo se enriquece de manera sostenible con propágulos fúngicos (las esporas, a partir de las cuales crecen nuevos hongos), que beneficiarán a las plantas cultivadas. En la naturaleza, las plantas hipermicotrofas son las primeras en instaurarse durante la regeneración de la cubierta forestal.

Otra posibilidad consiste en repartir grandes cantidades de hongos en el suelo de una sola vez. Se puede adoptar también una estrategia combinada con las prácticas agrícolas tradicionales, como el *zaï*. En este caso, se concentrarían los microorganismos en las cubetas en las que se plantan los árboles o las plantas, con lo que se necesitaría añadir una menor cantidad de hongos.







LOS HONGOS MICORRÍCICOS (*a*) son microorganismos del suelo que establecen simbiosis con las plantas. Desarrollan largos filamentos, las hifas, que penetran en las células de las raíces, con las que establecen intercambios diversos (*b*). Al aportarles agua y minerales, favorecen el crecimiento vegetal (*c: a la izquierda, plantas de cuatro meses sin hongos; a la derecha, plantas de cuatro meses con hongos*).

En los viveros, se mezclan raíces colonizadas por micorrizas en la tierra de la maceta. Esta técnica se utilizó por primera vez en la Gran Muralla Verde en junio de 2012, en ciruelos indios. Pasados cuatro meses de cultivo en tiestos, los pimpollos eran mucho más altos que los que se habían cultivado sin hongos. Al cabo de un año, seguían presentando un tamaño muy superior y una mortalidad menor. Dentro de un año o dos podrá determinarse el efecto sobre la producción de frutos, que se inicia alrededor de los tres años de edad.

En 2014, se prevén otras plantaciones en Senegal, Mali y Burkina Faso, en las que se combinarán árboles micorrizados con otros que no lo estén. El objetivo es que sirvan de escaparates para las poblaciones locales, a fin de mostrar las ventajas de las simbiosis micorrícicas. Se espera así fomentar las prácticas que las favorecen y conseguir su aplicación a gran escala.

ELIMINAR PLANTAS PARÁSITAS

Otro ámbito en el que los microorganismos edáficos podrían demostrarse útiles es en la lucha contra los fitoparásitos. En el África subsahariana los cereales constituyen la base de la alimentación, y determinadas plantas parásitas limitan mucho su producción. La peor es la especie *Striga hermonthica*, que se fija a la raíz del cereal y absorbe su savia hasta provocarle el marchitamiento y la muerte. Esta planta abunda en los suelos degradados de las regiones semiáridas, donde reduce el rendimiento de sus principales cultivos alimentarios: sorgo, mijo, maíz, arroz y fonio o digitaria. Las pérdidas varían entre el 10 y el 90 por ciento de las cosechas, con una media estimada del 40 por ciento en el África subsahariana (unos 8.300.000 toneladas de plantas de cultivo alimentarias). Así pues, *Striga hermonthica* amenaza con el hambre a más de 300 millones de habitantes de esa región.

Se han desarrollado diversos métodos para luchar contra este parásito, como arrancarlo del suelo o seleccionar variedades de cultivos resistentes a la aplicación de herbicidas. No obstante, los resultados han sido decepcionantes. *Striga hermonthica* es difícil de eliminar, porque aunque se supriman las plantas, las semillas sobreviven durante décadas en el suelo.

Después de muchos años, distintos programas de investigación intentan encontrar un atajo, ya sea inhibiendo la germinación de las semillas o el desarrollo de las plántulas, ya sea estimulando una germinación «suicida» (en ausencia de la planta huésped, con lo que el parásito no puede sobrevivir). De esta

Avance del desierto en las zonas áridas

La desertificación conlleva el empobrecimiento del suelo en determinadas regiones, en las que acaba instalándose el desierto. Afecta sobre todo a las zonas áridas, que representan el 41 por ciento de la superficie de los continentes. Se debe a múltiples causas, naturales o antrópicas.

Varios factores naturales intervienen en las zonas áridas de forma habitual, (déficit pluviométrico, temperaturas elevadas, fuerte insolación), o bien de forma excepcional (como las inundaciones en la costa, que salinizan los suelos).

El principal factor antrópico es la sobreexplotación de la tierra. Los monocultivos resultan perjudiciales porque consumen siempre los mismos tipos de nutrientes; por otro lado, las necesidades de leña, nuevas tierras de cultivo y pastos llevan a la deforestación. Además, los patógenos y parásitos limitan la productividad de los sistemas agrícolas. Los cultivos y los árboles exhiben menos tolerancia a estas agresiones cuanto más empobrecidos se hallan los suelos en nutrientes. *Striga hermonthica*, una planta parásita de los cereales, supone pérdidas que van del 10 al 90 por ciento de las cosechas. En este caso, la tierra ya no puede alimentar a los agricultores, que las abandonan. Desprovista de plantas que puedan estabilizar la capa de suelo fértil superficial, la tierra es arrastrada por el viento y la lluvia y se torna desértica.

Las zonas áridas son las más vulnerables, pues la regeneración natural de la cobertura vegetal y de los suelos es de cinco a diez veces más lenta que en las zonas con precipitaciones más abundantes y regulares. Además, el PIB de estas regiones es un 50 por ciento inferior al de las no áridas, por lo que los agricultores acceden con dificultad a los métodos modernos. Y en los años noventa la población aumentó en estas zonas un 18,5 por ciento, lo que ha elevado la presión sobre los recursos.



La planta parásita *Striga hermonthica*, que se fija a las raíces de los cereales y bombea su savia, acarrea pérdidas importantes en los cultivos.

manera, se destruirían las simientes existentes y se evitaría la producción de otras nuevas. Algunos microorganismos fúngicos o bacterianos autóctonos del suelo sintetizan sustancias que poseen dichos efectos. Hace más de diez años, el equipo de uno de los autores (R. Bally) descubrió que determinadas bacterias del género *Azospirillum* son patógenos temibles para *Striga hermonthica*. Producen una molécula que impide su germinación en un estadio precoz y acarrea la muerte de la semilla.

La utilización de tales microorganismos constituye una opción preferente, porque ya están adaptados a las condiciones del medio. Aunque muy lentamente, están empezando a ser incorporados en nuevos bioplaguicidas. Así, se está creando una plataforma técnica en Ouagadougou para explotar las bacterias del género *Azospirillum*. La plataforma realiza presentaciones en explotaciones agrícolas pequeñas para demostrar la eficacia del producto. La utilización de estos bioplaguicidas es posible a corto plazo y fácil de integrar en las prácticas agrícolas tradicionales de estas regiones. Junto con los hongos micorrícicos, permitiría aumentar de manera notable la productividad de los agrosistemas, incluso sin aplicar los abonos y plaguicidas empleados en los países desarrollados.

La importancia de la desertificación en África ha provocado la movilización conjunta de los políticos y científicos. La Gran Muralla Verde representa a la vez un escaparate y un campo de experimentación de los métodos para frenarla. Debe servir para obtener datos científicos que ayuden a rehabilitar los ambientes degradados y mejorar la calidad de vida de la población humana. Ya hay otros países que se interesan en la iniciativa. Brasil participa también en la financiación de la Gran Muralla Verde y espera inspirarse en algunos de sus proyectos para luchar contra la desertificación que amenaza las regiones áridas del nordeste del país.

PARA SABER MÁS

Initiative Grande Muraille Verte du Sahara et du Sahel. Note introductive n.º 3. VV.AA. Observatoire du Sahara et du Sahel, 2008.
Les bénéfices de la gestion durable des terres. VV.AA. WOCAT-UNCCD, 2009.
Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte: Concepts et mise en oeuvre. A. Dia y R. Duponnois. Éditions IRD, Montpellier, 2010.
La Grande Muraille Verte: Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux. A. Dia y R. Duponnois. Éditions IRD, Montpellier, 2012.
La Grande Muraille Verte, des arbres contre le désert. Dirigido por G. Boëtsch. Éditions Privat, Toulouse, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

La gestión ecológica de los suelos agrícolas. J. Romanyà Socoró en *IyC*, octubre de 2012.
Tierra prodigiosa. R. Conniff en *IyC*, noviembre de 2013.
Las zonas áridas, cada vez menos fértiles. D. A. Wardle en *IyC*, junio de 2014.
La desertificación en el sudeste ibérico. J. Albaladejo en *IyC*, junio de 2014.

Juan Albaladejo Montoro es profesor de investigación en el Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CSIC), en Espinardo, Murcia. Su labor se centra en el estudio, evaluación y control de la degradación del suelo y la desertificación.



EDAFOLOGÍA

LA DESERTIFICACIÓN EN EL SUDESTE IBÉRICO

Se están llevando a cabo varias investigaciones para mejorar la gestión de las zonas degradadas de clima semiárido

Juan Albaladejo Montoro

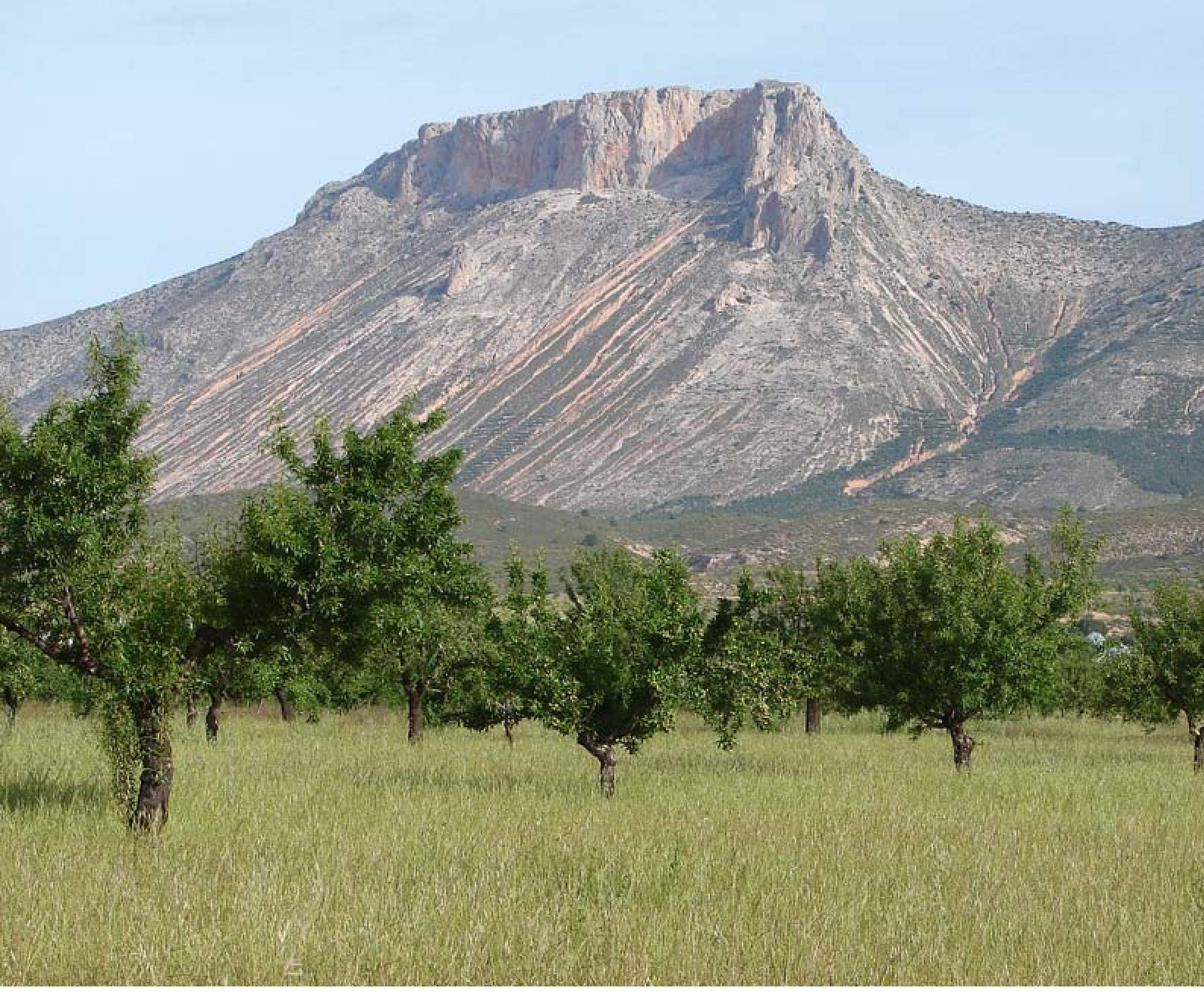
LA DESERTIFICACIÓN COMPRENDE UN CONJUNTO DE PROCESOS DE DEGRADACIÓN QUE AFECTAN a los distintos componentes del ecosistema (suelo, flora y fauna) y disminuyen su capacidad productiva. En las etapas finales de este fenómeno se pueden incluso alcanzar situaciones semejantes a las de un desierto. Por definición, el término desertificación se limita a las regiones áridas, semiáridas y seco-subhúmedas del planeta, es decir, las que presentan un balance negativo en sus recursos hídricos. En estas condiciones de déficit hídrico, los ecosistemas son muy frágiles y vulnerables, y tienen una escasa capacidad de recuperación, tanto frente a las perturbaciones antrópicas (cambios en el uso del suelo o excesiva presión sobre los recursos), como frente a las naturales (cambio climático).

EN SÍNTESIS

En España, las zonas con riesgo de desertificación afectan a las regiones con clima semiárido. Estas ocupan alrededor del 65 por ciento del territorio y se concentran principalmente en el sudeste de la península, Canarias y parte del valle del Ebro.

Estas áreas sufren especialmente los efectos del cambio global. Las prácticas habituales de manejo del suelo, el ascenso de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones favorecen la pérdida de fertilidad y la erosión del suelo.

Para evitar la degradación progresiva de los sistemas semiáridos y fomentar su regeneración se está estudiando la eficacia de ciertas medidas correctoras, como la introducción de abonos verdes, la labranza reducida y la reforestación.



EL ABONO VERDE constituye una de las medidas de manejo sostenible para reducir la erosión y aumentar la fertilidad del suelo. En este cultivo de almendros en secano, el abono verde consiste en sembrar entre los almendros una mezcla de cebada (*Hordeum vulgare*) o avena (*Avena sativa*) y veza (*Vicia sativa*) en otoño, la cual se incorpora al suelo en primavera mediante labranza. Al fondo se observan procesos de erosión por cárcavas en las laderas de la sierra del Gigante (Almería).

JORIS DE VENTE

Debido a la coincidencia geográfica de las regiones áridas y semiáridas con las áreas más deprimidas del mundo, la desertificación, además de su componente físico, posee un marcado componente socioeconómico. En los casos más extremos, la sobreexplotación de los recursos en la lucha por la supervivencia humana acelera la desertificación y, en un círculo vicioso, conduce a una mayor pobreza. Dada la complejidad de las causas del fenómeno, la evaluación y control de los procesos de degradación, así como la recuperación de las áreas afectadas, deben abordarse desde diferentes aspectos y siempre con un enfoque multidisciplinar.

En nuestro país, se estima que más de dos terceras partes de la superficie se halla expuesta a la desertificación, según datos del Programa de Acción Nacional contra la Desertificación, del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Las Comunidades de Murcia, Andalucía y Canarias son las más afectadas, con más del 40 por ciento de su territorio en situación de alto riesgo. Le siguen Castilla-La Mancha, Valencia, Madrid, Extremadura y Aragón, con un 30 por ciento de su superficie gravemente amenazada. En el resto del territorio español, menos del 15 por ciento de la superficie sufre problemas de desertificación.

Las comunidades vegetales predominantes en las áreas con mayor riesgo están constituidas por matorral semiárido mediterráneo, muy degradado a causa del sobrepastoreo. Se trata de tomillares, espartales, romerales, albaidales, etcétera. Otros sistemas especialmente sensibles son los campos de cultivo abandonados en fase de recolonización natural.

En el Grupo de Erosión y Conservación de Suelo y Agua (www.soilwaterconservation.es) del Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC), en Murcia, varios equipos estamos trabajando, en las últimas décadas, en distintos

temas: los procesos de desertificación, la recuperación de las áreas afectadas y la adaptación de los ecosistemas al cambio climático, así como posibles estrategias para mitigarlo.

EL CONTENIDO ORGÁNICO DEL SUELO

Junto con M. Martínez Mena estamos evaluando el impacto de los cambios de uso y manejo de las tierras sobre los contenidos en materia orgánica y la fertilidad de los suelos semiáridos. Nuestros datos demuestran que el tipo de uso al que se destina el suelo es el factor que más influye sobre su contenido orgánico. De este modo, la conversión de zonas de bosque en cultivos supone una reducción superior al 20 por ciento en la cantidad de carbono orgánico, una disminución que llega a superar el 50 por ciento en las capas superficiales más fértiles. Por consiguiente, tal conversión debe restringirse al máximo en las áreas semiáridas. Además, con el fin de recuperar la fertilidad de los suelos y aumentar el secuestro de carbono, las actuaciones de reforestación o revegetación deberían concentrarse en los suelos agrícolas y no en las áreas montañosas de matorral y bosque, dada la reducida capacidad de las áreas semiáridas de montaña para fijar carbono (a causa de la escasa profundidad del suelo).

En cuanto al efecto del cambio climático, hemos observado que en estas zonas se están acelerando los procesos de desertificación debido a la degradación de la materia orgánica edáfica provocada por el aumento de la temperatura y la reducción de las precipitaciones. Tales alteraciones serán sin duda más pronunciadas en las capas superficiales y más fértiles, lo que conllevará una pérdida importante de la productividad del suelo.

Por otro lado, estamos evaluando los beneficios de las prácticas agrícolas sostenibles que pueden ayudar a frenar la desertificación. En concreto, se analiza el rendimiento de los cultivos, el control de la erosión y el secuestro de carbono en respuesta a distintos sistemas de manejo: la labranza reducida, la labranza reducida combinada con abonos verdes y la ausencia de laboreo. Nuestros resultados indican que la conversión de laboreo intensivo a labranza reducida mejora las propiedades físicas del suelo y disminuye el riesgo de erosión hídrica. En concreto, conlleva una pérdida tres veces menor de suelo y agua por erosión que el laboreo convencional, al tiempo que restringe la pérdida de materia orgánica. Además, la labranza reducida atenúa las emisiones de CO_2 del suelo a la atmósfera, con lo que se mitiga el cambio climático. Cabe señalar que la introducción de abono verde (que consiste en cultivar una planta para enterrarla e incrementar de este modo la fertilidad del suelo) aumentó la cantidad de carbono y nitrógeno edáficos, así como la biomasa microbiana, sin que se incrementaran las emisiones de CO_2 a la atmósfera. Nuestros estudios destacan el papel de los abonos verdes en la activación del ciclo del carbono, en especial en la estabilización fisicoquímica del carbono edáfico.

VEGETACIÓN Y MICROORGANISMOS EDÁFICOS

El equipo dirigido por J. I. Querejeta estudia los impactos del cambio climático sobre la vegetación y los microorganismos edáficos en ecosistemas que sufren procesos de desertificación. Analizan el efecto combinado del ascenso de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones en zonas remanentes de vegetación arbustiva, que constituyen la parte del ecosistema donde se concentra la actividad biológica y los ciclos de carbono, nutrientes y agua. Las investigaciones en marcha pretenden identificar los mecanismos fisiológicos responsables de la fuerte disminución en el estado nutricional, la fotosíntesis neta y la eficiencia en el uso del agua en las plantas expuestas al cambio climático.

También se está examinando el efecto de la menor productividad vegetal sobre la composición y estructura taxonómica y funcional de las comunidades microbianas del suelo, incluidos los hongos micorrícicos, que establecen relaciones de simbiosis con las raíces de las plantas. Los datos generados por esta línea de investigación son imprescindibles para modelizar las respuestas de los procesos de desertificación a escala de ecosistema y permitirán desarrollar directrices para una gestión ambiental de los frágiles ecosistemas semiáridos que mitigue los impactos negativos del cambio climático.

MEJORA DE LA GESTIÓN

El manejo sostenible de los suelos, la aplicación de medidas de gestión a través de procesos participativos y la modelización de los impactos regionales en distintos supuestos de cambio climático se perfilan como tres herramientas básicas en el control de la desertificación. En estos temas trabaja el equipo de J. de Vente y C. Boix Fayos.

Además de la modificación de los sistemas de labranza y la incorporación de cubiertas verdes comentadas antes, la revegetación estratégica en fajas o mosaicos permite reducir la agresividad de las aguas de escorrentía y controlar la erosión





EN ESTA ÁREA EXPERIMENTAL de Sorbas (Almería), se simulan las condiciones de mayor calor y aridez que provocará el cambio climático, y se estudia su efecto en la vegetación. La caseta de exclusión parcial de lluvia reduce en un 30 por ciento la precipitación (*primer plano*) y las dos cámaras abiertas (*open top chambers*) de metacrilato (*primer y segundo plano*) hacen aumentar localmente la temperatura por efecto invernadero, en promedio unos 2 ºC al año.

JOSÉ IGNACIO QUEREJETA

y producción de sedimentos. Se trata de una medida eficaz a escala de campo de cultivo y de cuenca hidrográfica. Asimismo, la ubicación estratégica de obras de hidrotecnia y la combinación de distintos usos y manejo del suelo que promuevan la resiliencia y la recuperación del ecosistema se revelan como estrategias útiles en la lucha contra la desertificación y en la adaptación al cambio climático a largo plazo. De este modo, las zonas de bosque o matorral entre las áreas de cultivo producen una discontinuidad hidrológica y actúan como un sumidero de agua y sedimentos.

Los humanos formamos parte de la mayoría de los ecosistemas, por lo que la gestión ambiental exige un enfoque socioecológico. Sin embargo, a menudo las medidas se implementan de forma jerárquica y llevan al fracaso, porque las partes implicadas y afectadas no se sienten involucradas en el proceso de decisión y búsqueda de soluciones. La participación de los agentes sociales en la gestión ambiental facilita la acometida y resolución de conflictos y fomenta la confianza entre los actores. Estos son más propensos a apoyar los objetivos del proyecto y aplicar soluciones de manejo sostenible socialmente aceptadas y económicamente racionales.



DIQUE DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS con morfologías erosivas aguas abajo. El uso excesivo de obras de hidrotecnia puede conducir a un déficit sedimentario en los cauces, que comienzan a sufrir erosión en su propio lecho y en los bancos laterales.

CAROLINA BOIX

REVEGETACIÓN DE ÁREAS DEGRADADAS

Respecto al uso de las repoblaciones forestales para mitigar la desertificación y el cambio climático mediante el secuestro de carbono, se ha constatado que su efectividad depende de las técnicas empleadas. El equipo de investigación dirigido por V. Castillo, A. Roldán, J. I. Querejeta y G. González Barberá ha desarrollado una metodología para la revegetación o reforestación de áreas en condiciones ambientales hostiles, basada en tratamientos biotecnológicos del suelo y la planta antes de la plantación. La preparación del suelo se realiza mediante aterrazado con subsolado y adición de enmienda orgánica; para aumentar la resistencia de la planta a las condiciones de estrés ambiental, en el vivero se inoculan los plantones que se van a introducir con hongos micorrícicos autóctonos adaptados a la sequía. Estos hongos, asociados a las raíces, aumentan la capacidad de absorción de agua y nutrientes de la planta.

En experimentos a largo plazo hemos comprobado que la reforestación con la metodología descrita mejora las propiedades físicas y la fertilidad del suelo tras veinte años de plantación, con a un aumento de 13 toneladas por hectárea de carbono orgánico total en el ecosistema reforestado respecto a la zona natural no intervenida. Pero en una zona próxima donde la revegetación se realizó sin preparación del terreno y la planta, los efectos negativos del aterrazado sobre las propiedades del suelo y el balance de carbono perduraron a lo largo del tiempo, por lo que la intervención no supuso una mejora respecto a la zona natural sin plantar.

Parece evidente que si no se controla la desertificación y no se rehabilitan las tierras degradadas será imposible garantizar la seguridad alimentaria y los bienes y servicios de los ecosistemas áridos y semiáridos, en especial en un futuro amenazado por el cambio climático. Incluso, la estabilidad política de los países en desarrollo y la paz mundial puede verse en peligro por el avance de la desertificación. Sería un gran despilfarro que todo el conocimiento científico y técnico disponible quedara en el ostracismo por la apatía del entorno sociopolítico para poner en práctica las soluciones al grave problema de la desertificación. Desde nuestro grupo trabajamos para generar nuevos conocimientos y fomentar su diseminación y aplicación para prevenir y adaptar nuestra sociedad a los enormes retos que nos presenta el cambio global.

PARA SABER MÁS

The impact of land use change and check-dams on catchment sediment yield. C. Boix-Fayos et al. en *Hydrological Processes*, n.º 22, vol. 25, págs. 4922-4935, 2008.

Isotopes reveal contrasting water use strategies among coexisting plant species in a Mediterranean ecosystem. C. Moreno-Gutiérrez et al. en *New Phytologist*, n.º 196, págs. 489-496, 2012.

Land use and climate change impacts on soil organic carbon stocks in semi-arid Spain. J. Albaladejo et al. en *Journal of Soil and Sediments*, n.º 13, págs. 266-277, 2013.

Carbon dynamics after afforestation of semiarid shrublands: Implications of site preparation techniques. N. Garcia-Franco et al. en *Forest Ecology and Management*, n.º 319, págs. 107-115, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Agricultura sin labranza. D. R. Huggins y J. P. Reganold en *IyC*, septiembre de 2008.

Reforestación. P. J. Rey y J. M. Alcántara en *IyC*, febrero de 2011.

La Gran Muralla Verde. R. Bally y R. Duponnois en *IyC*, junio de 2014.

Las zonas áridas, cada vez menos fértiles. D. A. Wardle en *IyC*, junio de 2014.

por Diego Llusia, Juan Francisco Beltrán y Rafael Márquez

Concierto de sapos y ranas

Las vocalizaciones de estos anfibios ofrecen información esencial sobre el individuo y facilitan la reproducción

Cualquiera que se haya aproximado a una ribera o una charca en una noche de primavera habrá podido descubrir el fenómeno sonoro producido por algunas especies de ranas y sapos durante la reproducción: solitarios tenores, duetos acompasados o coros de un sinfín de machos en ruidosas agregaciones. Tales sonidos esconden impresionantes adaptaciones con las que estas especies transmiten información a sus congéneres.

Los anuros, el grupo de anfibios que engloba a lo que comúnmente conocemos como ranas y sapos, disponen de un reducido repertorio de señales acústicas que facilitan la reproducción y contribuyen a la pervivencia de la especie. Los sonidos, emitidos principalmente por los machos, proporcionan información acerca de la identidad (especie, sexo), calidad (condición física, tamaño corporal), motivación (anuncio, amenaza) o ubicación del individuo. Las vocalizaciones suelen utilizarse para atraer a la pareja, rechazar el acoplamiento o defender el territorio.

En la península ibérica, los sistemas de comunicación de las ranas arborícolas del género *Hyla* y los sapos parteros del género *Alytes* han sido ampliamente estudiados en las últimas décadas. Las primeras disponen de un saco vocal prominente donde retienen el aire que atraviesa las cuerdas vocales, con las que emiten potentes llamadas de apareamiento. Los segundos solo producen un discreto silbido para atraer a las hembras en la oscuridad y reproducirse con éxito.

Los anuros sufren hoy una mayor amenaza que otros grupos de vertebrados. Algunos investigadores nos hemos preguntado cómo se verá afectada la comunicación acústica de estas especies debido al cambio climático y a la contaminación acústica. Varias técnicas novedosas, como el seguimiento acústico automático (audiotrampeo), combinadas con métodos clásicos de estudio comportamental (test de playback), nos permiten analizar estos interrogantes en poblaciones naturales.

Así, hemos demostrado que las especies *Alytes* e *Hyla* pueden mantener su actividad acústica en un amplio rango de temperaturas, lo que sugiere que las tasas actuales de calentamiento global no inhibirían directamente su comportamiento de canto. Pero los ruidos ambientales, ya sean antrópicos o naturales, parecen alterar de forma notable la actividad de especies como el sapo partero ibérico, que experimenta un importante descenso en la emisión de llamadas de apareamiento. De todos modos, se necesitan nuevas investigaciones para evaluar si el cambio global puede perjudicar la función central que desempeña la comunicación en estas sociedades animales.

—Diego Llusia
Museo Nacional de Historia Natural, CNRS, París

—Juan Francisco Beltrán
Dpto. de zoología, Universidad de Sevilla

—Rafael Márquez
Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, Madrid

ISABEL CATALÃO (*Hyla molleri*); DIEGO LLUSIA (*Alytes obstetricans*)



MACHO DE RANITA DE SAN ANTÓN (*Hyla molleri*) hinchando su saco vocal durante la emisión de la llamada de apareamiento.

MACHO DE SAPO PARTERO COMÚN (*Alytes obstetricans*) cargando con larvas en avanzado estado de madurez.

PAREJA DE SAPOS PARTEROS COMUNES (*Alytes obstetricans*) en amplexo, o acoplamiento, durante la transferencia de huevos entre la hembra (*debajo*) y el macho (*arriba*). Los oscilogramas del repertorio vocal de la especie corresponden a la llamada de apareamiento de un macho (*a*), la de cortejo de una hembra (*b*), la de cortejo de un macho (*c*) y una llamada de peligro (*d*).

por Jimena Canales



Jimena Canales ocupa la cátedra Thomas M. Siebel de historia de la ciencia en la Universidad de Illinois.

Las ficciones de Einstein

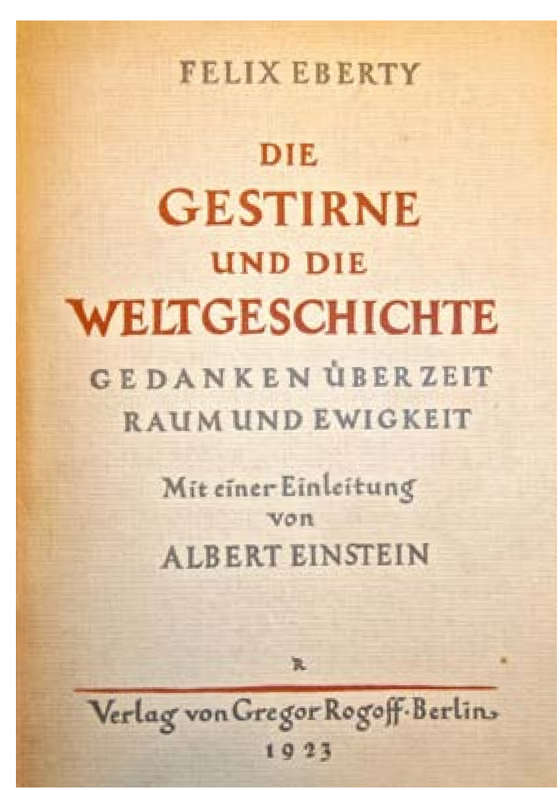
Además de revolucionar los conceptos de espacio y tiempo, Albert Einstein escribió la introducción de un libro de ciencia ficción

Einstein era en los años veinte del siglo pasado un escritor avezado y prestigioso, un premio nóbel de física con capacidad de encandilar al gran público. Su libro de divulgación sobre relatividad (*Sobre la teoría especial y general de la relatividad*, 1917) había sido traducido al inglés, francés, español, italiano, húngaro, ruso, polaco y yiddish. Sus lectores aprendían física a través de historias de rayos que caían sobre vías de tren y de personas que, tras observar lo que ocurría tanto desde el tren como desde fuera de él, tenían que descartar el viejo espacio absoluto de Newton. Einstein era muy consciente del poder de su imagen pública. Se sentía como el rey Midas de los medios de comunicación, capaz de transformar en noticia cuanto hacía: «Me pasa como al personaje del cuento que convertía en oro todo lo que tocaba: todo lo que hago se convierte en titular».

Aun así, en junio de 1923 muchas cosas, además de la física, preocupaban a Einstein. Con la inflación desbocada en Alemania, no ganaba lo suficiente para mantener a su familia y a su primera mujer. Asimismo, su teoría de la relatividad especial era ferozmente atacada por colegas antisemitas y sutilmente cuestionada por uno de los filósofos más importantes de su tiempo, el francés Henri Bergson. Por si fuera poco, ni Albert A. Michelson, que había contribuido con sus experimentos a la contrastación de la teoría, ni Hendrik Lorentz, que había proporcionado las ecuaciones, estaban convencidos del todo.

Siendo así, ¿por qué había de molestarse un científico de fama mundial en prologar un libro de historias imposibles? Einstein tenía sus razones. El libro especulaba con viajar a una velocidad mayor que la de la luz, una posibilidad que si llegara a realizarse invalidaría la teoría de la relatividad, según la cual la velocidad de la luz es un límite infranqueable. El protagonista del relato, sin embargo, era un hombre que se movía velozmente equipado con un simple telescopio.

¿Cómo vería el mundo alguien que se alejara de la Tierra a una velocidad superlumínica? Los científicos sabían desde el siglo XVII que la luz tenía una velocidad finita. Hoy sabemos que la luz que nos llega de las estrellas ha empleado cierto tiempo hasta llegar a nuestros ojos, de modo que nuestra imagen de ellas corresponde al pasado. ¿Qué ocurriría si viajáramos a una velocidad mayor que la de la luz? Las ondas luminosas procedentes de nuestro planeta no llegarían a alcanzarnos. Solo veríamos las que hubieran sido emitidas antes de emprender el viaje, las únicas capaces de llegar tan lejos como nosotros. Si lleváramos un telescopio potente y lo enfocáramos a la Tierra, veríamos el mundo tal como era en el pasado.



La idea de contemplar el pasado no era una fantasía; desde luego no antes de Einstein. Era una posibilidad que aún no había sido realizada, pero que probablemente acabaría siéndolo a juzgar por la experiencia reciente y los conocimientos más avanzados disponibles. La máquina de vapor y el telégrafo habían revolucionado las comunicaciones y el transporte, y no parecía que el aumento vertiginoso de la velocidad tuviera límites. Hasta 1905, año en que Einstein publicó su célebre artículo sobre la relatividad, era lógico pensar que cada vez se alcanzarían velocidades mayores. Se enseñaba a los niños a imaginarlas. Para ellos no era descabellado aceptar que un viajero más rápido que la luz sería capaz de ver el pasado, hasta el origen del universo. Los predicadores predecían, basándose en la ciencia más avanzada de su tiempo, que se descubriría a aquellos que habían conseguido ocultar sus crímenes, a menos que los hubieran perpetrado en lugares que no hubieran dejado escapar ningún rayo luminoso.

La historia del viajero superlumínico, atribuida al jurista y escritor de ciencia Felix Eberty, había sido contada muchas veces desde su publicación anónima a mediados del siglo XIX, hasta que Einstein acabó finalmente con ella. La teoría de la relatividad demostraba que nadie podría nunca viajar más deprisa que la luz.

Eberty había descrito un observador capaz de moverse rápidamente a fin de alterar el tiempo que empleaban los acontecimientos en llegar a él. Su ojo podría «captar la rápida sucesión de estas imágenes consecutivas». Desde una estrella

lejana de magnitud 12, «contemplaría el aspecto de la Tierra en tiempos de Abraham». Al saltar de una estrella a otra, «vería desfilar ante sus ojos, en una hora, la historia del mundo desde Abraham hasta el momento actual». Ajustando su velocidad «sería capaz de observar a placer cualquier momento de la historia del mundo». Este «microscopio del tiempo» permitiría estudiar no solo la historia, sino también procesos biológicos como la floración o el vuelo de las mariposas.

Einstein conoció la historia de niño, a través de un popular divulgador de la ciencia, Aaron Bernstein. Los increíbles relatos de Bernstein no eran ficciones, estaban basados en hechos científicos y pretendían educar. Explicaban el modo de viajar en el tiempo hasta la Revolución francesa o de conocer a Alejandro Magno:

«La luz de las escenas de la revolución científica está alcanzando en este momento cierto punto del espacio. En otro punto más alejado la invasión de los bárbaros estaba al orden del día, y más allá Alejandro Magno seguía conquistando el mundo [...] Y más allá aún, la representación del pasado de la Tierra mediante la luz avanzará hacia el futuro, retornando la vida a los acontecimientos históricos».

Las especulaciones científicas pasaron de la posibilidad de ver el mundo hacia atrás a la posibilidad de que las cosas ocurrieran hacia atrás. Alrededor de 1900 esta era una posibilidad real.

Einstein no cesó de pensar en la historia que había conocido de niño, ni dejó de leer nuevas versiones. Cuando fundó en Berna la Academia Olympia, un pequeño grupo de amigos que compartían lecturas, uno de los autores escogidos fue Karl Pearson, excelente matemático y ardiente darwinista. En *La gramática de la ciencia*, Pearson describía al viajero infinitamente veloz. Su conclusión era que la idea de que la historia fluía en una única dirección resultaba de nuestra perspectiva en relación a ella. «La irreversibilidad de los procesos naturales corresponde a una concepción puramente relativa: la historia va adelante o hacia atrás según el movimiento relativo entre acontecimientos y observador.»

El astrónomo y divulgador francés Camille Flammarion también recreó la historia, añadiéndole más detalles sugerentes. Especuló con la posibilidad de registrar toda la historia mundial dirigiendo las ondas luminosas terrestres hacia un planeta lejano, cuya superficie fotosensible actuaría a modo de rollo fotográfico. Al girar sobre su eje, las imágenes sucesivas registrarían de forma «imperecedera [...] los grandes acontecimientos de la historia mundial». Flammarion bautizó este instrumento «cronotelescopio», una máquina capaz de ver el pasado, registrarlo, acelerarlo o frenarlo. El cronotelescopio permitía ver el tiempo marcha atrás. Por ejemplo, la batalla de Waterloo:

Era lógico pensar que cada vez se alcanzarían velocidades mayores. Se enseñaba a los niños a imaginarlas

«Era realmente Waterloo, pero un Waterloo de la otra vida, en el que los combatientes se alzaban de entre los muertos. En este espejismo singular, además, marchaban hacia atrás unos contra otros [...] No era menos notable el hecho de que a medida que luchaban aumentaba el número de combatientes; cada impacto de artillería era inmediatamente rellenado por un grupo de muertos resucitados».

Uno de los lectores de Flammarion era el gran matemático Henri Poincaré. Einstein y Poincaré entendieron de manera distinta estas historias, y también diferían sobre su interpretación de los efectos relativistas. El científico francés llevaba años dándole vueltas a la relatividad, pero, a diferencia de Einstein, no creía que los efectos relativistas fueran tan revolucionarios, ni que fuera necesario desmontar los conceptos de espacio y tiempo. Esta es la razón por la que Einstein recibió merecidamente el crédito de haber revolucionado la física y por lo cual Poincaré no obtuvo el mismo mérito.

Se afirma con frecuencia que Poincaré no llegó a entender del todo la relatividad, pero la historia de su relación con Einstein y la teoría es más compleja. El problema no es que no la comprendiera, sino que no quería aceptarla. En este sentido, quedó en minoría hasta que fue considerado un retrógrado.

Einstein y Poincaré también leyeron de forma distinta la historia del viajero superlumínico. Poincaré la citaba sin cuestionarla. Para el viajero veloz, «el tiempo cambiaría de sentido, la historia se desarrollaría marcha atrás, Waterloo tendría lugar antes que Austerlitz». Napoleón hubiera sido derrotado primero en Waterloo, para alzarse luego victorioso en Austerlitz. Puede que la secuencia invertida de las batallas de Napoleón resultara atractiva para un científico francés, encantado de que al final se alcanzara la victoria.

Poincaré sabía que no había sido detectada ninguna señal más rápida que la luz, pero no renunciaba a la posibilidad de que algún día se descubrieran «nuevas señales». No había ninguna razón por la que estas fueran «inconcebibles» y la historia del ser más rápido que la luz no pudiera hacerse realidad algún día. Cuando Einstein prologó el libro de Eberty, hacía más de diez años que Poincaré había muerto, pero sus objeciones a la relatividad seguían persiguiendo al físico. Algunos científicos y filósofos estaban convencidos de que la idea fundamental de que nada podía viajar más deprisa que la luz era una limitación técnica o una hipótesis conveniente, pero no una ley universal de la naturaleza.

¿Y si un día esta historia de ciencia ficción se hiciera realidad? En un mundo basado en los hechos, como los que apoyaban la teoría de la relatividad de Einstein, mucho dependía de la ficción.

PARA SABER MÁS

Naturwissenschaftliche Volksbücher (vol. 5, parte 21). Aaron Bernstein. Dümmler, Berlín, 1873-1874.

Narraciones del infinito: Lumen; Historia de un cometa; En el infinito. Camille Flammarion. Juan Oliveras, Barcelona, 1873.

Die Gestirne und die Weltgeschichte; Gedanken über Raum, Zeit und Ewigkeit. Felix Eberty. Dirigido por Gregory Itelson, con introducción de Albert Einstein. Gregor Rogoff Verlag, Berlín, 1923.

Ciencia y método. Henri Poincaré. Espasa-Calpe, Buenos Aires, 1946 (1908).

The mysteries and wonders of natural science: Aaron Bernstein's Naturwissenschaftliche Volksbücher and the adolescent Einstein. Gregory Frederick en *Einstein: The formative years, 1879-1909*, dirigido por John Stachel y Don Howard. Birkhauser, Boston, 2000.

Desired machines: Cinema and the world in its own image. Jimena Canales en *Science in Context*, vol. 24, n.º 3, págs. 329-359, 2011.

por Emilio Muñoz

Emilio Muñoz, experto en biología molecular y celular, y expresidente del CSIC, desarrolla su actividad investigadora actual en la Unidad de investigación en Cultura Científica del CIEMAT.



La cultura científica

De los eurobarómetros a los desafíos de la sociedad española actual

El interés por la cultura científica surgió con la primera crisis de la política científica moderna. Esta política nació en los EE.UU. tras la Segunda Guerra Mundial, con la entrega al presidente Roosevelt del Informe *Science: The endless frontier* («Ciencia, la frontera sin límites»), elaborado por su asesor, el ingeniero Vannevar Bush. En él se señalaba que el gobierno debía suministrar fondos públicos para promocionar la ciencia, factor estratégico para el futuro del país. A su vez, se prescribía la autonomía de los científicos en la gestión de esos fondos, mientras que las empresas serían las encargadas de desarrollar aplicaciones basadas en los conocimientos científicos y así generar riqueza.

No obstante, la primera crisis del petróleo en la década de los setenta llevó a los responsables de las políticas económicas en Europa, y hasta cierto punto en EE.UU., a cuestionar la confianza plena en los científicos que propugnaba el informe de Bush. Como resultado, y dentro de las ciencias humanas y sociales, emergió un movimiento centrado en el estudio de las relaciones entre la ciencia, la tecnología y la sociedad (CTS). Uno de los objetivos de dicha corriente era conocer el modo en que los ciudadanos percibían la ciencia, con el propósito de estimar el apoyo a la atribución de fondos públicos o incluso la aceptación de ciertas investigaciones y de los desarrollos técnicos resultantes.

Los estudios sobre la percepción social de la ciencia (y la tecnología) deben valorarse como instrumento básico para el diseño de estrategias. La corriente principal, originaria de los países anglosajones, presupone una correlación entre opiniones y actitudes, y los niveles de alfabetización científica de la sociedad (*public scientific literacy*, de la escuela estadounidense) o la comprensión social de la ciencia (*public understanding of science*, de orientación inglesa).

El instrumento para obtener esa valoración son las encuestas de opinión. En Europa, la principal fuente de información corresponde a los eurobarómetros, realizados en 1977, 1979, 1989, 1992, 2010 y 2013. Su contenido es variable. Incluye preguntas para evaluar los riesgos y las expectativas; para intentar apreciar los intereses y la confianza de los ciudadanos ante los avances científicos y tecnológicos; o cuestiones sobre técnicas específicas (la biotecnología o los contaminantes ambientales, por ejemplo). Aunque no existe consenso, algunos trabajos parecen indicar que los cuestionarios no miden adecuadamente la cultura científica ni su relación con las ideas universales.



España se incorporó tarde al movimiento CTS, si bien el impulso (asociado con la europeización) fue notable. Las encuestas estatales se lanzaron con la creación de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT), dentro de la ola generada por el concepto de «espacio europeo de la investigación». La primera se realizó en 2002 y desde entonces se han venido celebrando en los años pares hasta 2012. Además de los resultados descriptivos que se han ido haciendo públicos ese mismo año, la FECYT ha encargado análisis más finos a grupos de expertos que se han publicado en volúmenes especiales editados por la propia fundación los años impares siguientes (está pendiente el de 2013).

Tanto en las encuestas europeas como en las nacionales, pocos ciudadanos españoles muestran interés por la ciencia y la tecnología como material informativo, aunque esa fracción ha ido creciendo hasta alcanzar el 13 por ciento de los encuestados. El formato de pregunta les pide elegir 3 temas entre una lista de 14, en la que «ciencia» ocupa la décima posición. Ello ha duplicado el 6,6 por ciento obtenido en 2004, año en que la opción «ciencia» se situaba en la penúltima posición. Se valora también el interés general en un tema, mediante una escala del 1 (poco) al 5 (mucho). La «ciencia» y la «tecnología» han ocupado de forma reiterada la quinta o la sexta posición entre nueve propuestas. Según el análisis que nuestro grupo de investigación realizó de los resultados del eurobarómetro de 2010, esta valoración intermedia es reflejo de cierta indiferencia ante algo que no se asume como propio, del convencimiento de que nuestro país no es líder en ciencia. Paradójicamente, es una constante que los científicos gocen de buena valoración en las encuestas.

La iniciativa más importante realizada en España sobre esta cuestión ocurrió en 2007. Se declaró Año de la Ciencia y la vicepresidenta Fernández de la Vega lanzó una importante proclama en pro de la cultura científica. Esta iniciativa política tuvo un efecto de promoción, pero, en opinión de quienes trabajamos en la Unidad de Investigación en Cultura Científica, incompleta y quizá sesgada por la idea de que la cultura científica se alcanza de forma unidireccional, transmitida desde los expertos (científicos) a los no expertos (ciudadanos). Bajo esta idea se crearon las Unidades de Cultura Científica en los centros de producción de la ciencia, sin tener en cuenta lo mucho que queda por investigar en este campo. Tal es el desafío.

por Pere Castells

Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es coordinador del proyecto UB-Bullipedia.



Sardinas

Su precio no va acorde con sus propiedades gustativas y nutricionales

Las sardinas son peces pelágicos y gregarios. Llevan a cabo largas migraciones y se alimentan sobre todo de plancton. Se incluyen en el orden de los Clupeiformes, suborden Clupeidos. A su misma familia pertenecen el arenque, la anchoa (o boquerón), la alacha, el espadín y el sábalo.

Se distribuyen por casi todo el mundo. La especie europea, o común (*Sardina pilchardus*), abunda en todo el litoral español y la zona occidental africana. Se hallan sobre todo en aguas cálidas, agrupadas en grandes bancos que se distinguen desde lejos debido a su movimiento. La temporada de pesca va de mayo a octubre; su consumo mayoritario se produce, por tanto, en verano.

Debido a la masificación de la captura de pescado en general y de la sardina en particular en la zona europea, los científicos que asesoran a Bruselas indicaron como tope de captura en el año 2013 55.000 toneladas para España y Portugal. En 2014, según el criterio de precaución, las flotas española y portuguesa no deberían capturar, en conjunto, más de 17.000 toneladas de sardina. Esta es, al menos, la recomendación que el Consejo Internacional para la Exploración del Mar (ICES) trasladó a la Comisión Europea en julio de 2013. Sin embargo, para la sardina no rige la exigencia comunitaria sobre el total admisible de capturas (TAC); su pesca es gestionada por las administraciones portuguesa y española a través de tallas mínimas, capturas máximas diarias, limitaciones de días de pesca y zonas de veda.

La reputación de la sardina ha variado a lo largo del tiempo. Antiguamente carecía de prestigio; se le atribuían una escasa digestibilidad y un alto contenido en grasas perjudiciales para la salud. Pero a partir de los años setenta del siglo pasado empezaron a demostrarse sus propiedades nutritivas, relacionadas con su abundante contenido en ácidos grasos poliinsaturados como los omega-3 [*véase* «Los ácidos grasos y la salud», por Jean-Michel Lecerf y Sylvie Vancassel; Investigación y Ciencia, abril de 2012]. Los trabajos de A. M. Nelson en 1972 con pacientes propensos al infarto demostraron que el pescado mejoraba su supervivencia entre un 32 y un 36 por ciento de los casos. En los estudios realizados en Dinamarca sobre la baja incidencia de enfermedades cardiovasculares de los esquimales se observó una relación directa entre el consumo de pescados con un alto contenido en ácidos grasos poliinsaturados y la casi nula manifestación de problemas cardiovasculares isquémicos.



CORTESÍA DE PERE CASTELLS

Un trabajo más reciente, llevado a cabo por expertos de la Escuela de Salud Pública de Harvard y la Universidad de Washington y publicado en 2013 en *Annals of Internal Medicine,* constató que los adultos que presentaban niveles altos en sangre de ácidos grasos omega-3 (presentes sobre todo en el pescado azul y el marisco) veían reducido hasta en un 27 por ciento el riesgo general de mortalidad y en un 35 por ciento la probabilidad de morir por enfermedades del corazón. En el estudio se observó también que los adultos con los niveles más altos de ácidos grasos vivían un promedio de 2,2 años más que los demás.

Pero no todo son ventajas. Para quienes padecen hiperuricemia (gota), las sardinas resultan poco indicadas dado su contenido en purinas, que en el organismo se transforman en ácido úrico.

De las toneladas de sardina destinadas a la alimentación, la mayor parte se consume como pescado fresco; el resto suele conservarse enlatado o curado. En España la sardina fresca tiene un precio muy inferior al que le correspondería según sus cualidades nutricionales y organolépticas. Encontramos sardinas de buena calidad por unos 4 euros el kilo. Las enlatadas son un testimonio del respeto por un producto exquisito y económico: mientras los 100 gramos cuestan en España unos 1,5 euros, en Francia se pagan a entre 4 y 5 euros (incluso hay latas catalogadas por año).

La tradición culinaria es muy extensa. En Galicia este pescado protagoniza un ritual imprescindible, siendo las sardinas a la brasa su versión más típica. En el Mediterráneo, la combinación de pasta con sardinas (*pasta con le sarde*) constituye el plato representativo de la cocina palermitana.

En el campo de la restauración no hay establecimiento de costa que no ofrezca sardinas en su carta: a la brasa, al horno, a la plancha, fritas o en otras preparaciones. En los restaurantes de élite, en cambio, hasta hace pocos años apenas se encontraban platos con sardinas (se consideraba un producto «de segunda»). En fecha más reciente, y sobre todo gracias a la revolución liderada por El Bulli, han empezado a considerarse los productos no por su precio sino por su valor organoléptico. En uno de sus libros de referencia *Los secretos de El Bulli: recetas, técnicas y reflexiones* (1997), Ferran Adrià introdujo diversas recetas con este pescado. Y en el Celler de Can Roca (en la actualidad considerado el segundo mejor restaurante del mundo), las sardinas han protagonizado varios platos de sus menús de degustación.

Las sardinas demuestran que podemos preparar recetas de gran valor nutritivo y gastronómico a un precio muy asequible.

LA SECRETA HISTORIA ESPIRITUAL DEL CÁLCULO

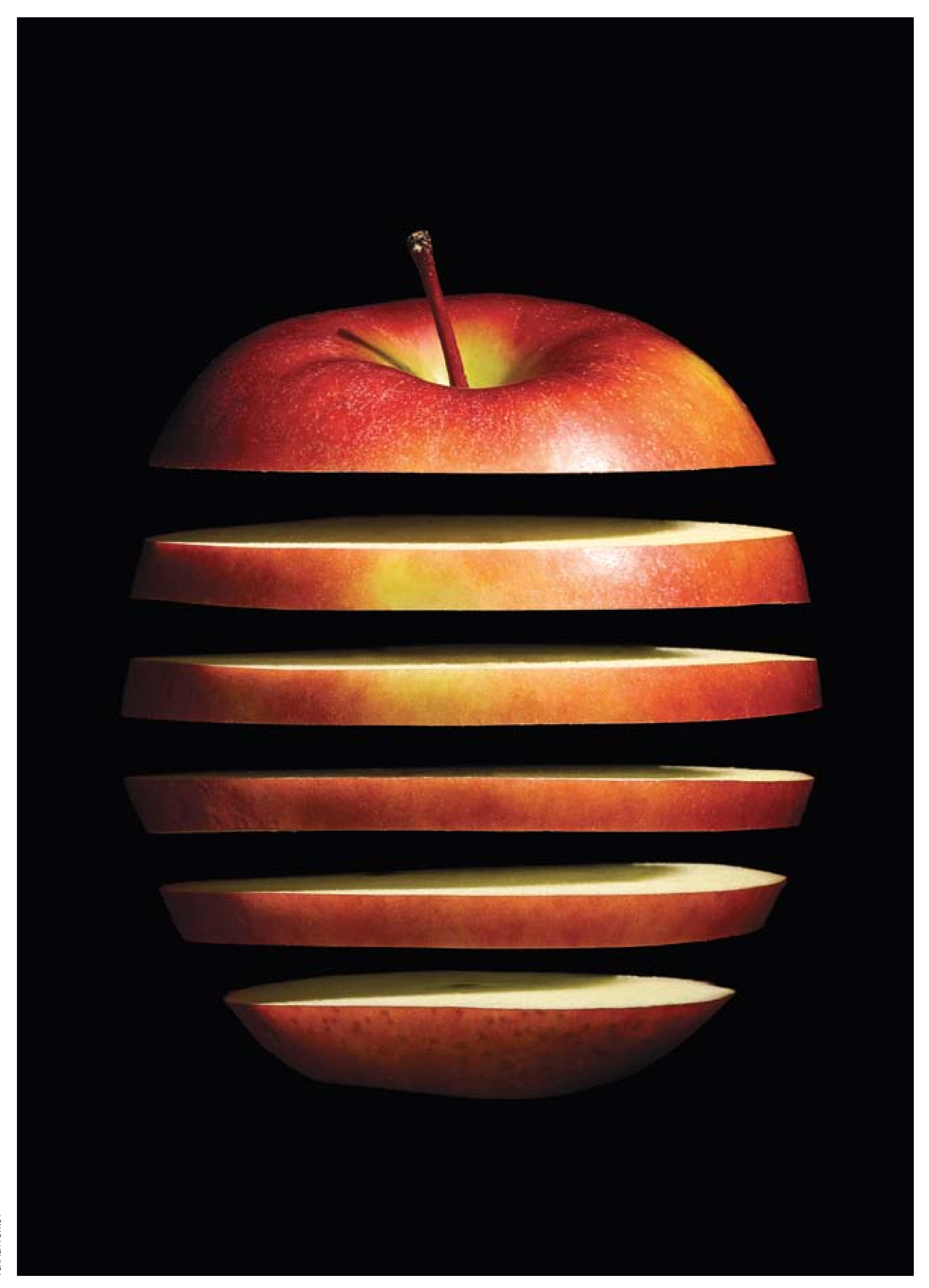
El cálculo integral surgió de un debate en el siglo XVII que fue de naturaleza tanto científica como religiosa

Amir Alexander

NOTA DE REDACCIÓN: Día tras día, millones de estudiantes aprenden cálculo integral, la rama de las matemáticas que se ocupa de determinar la longitud, área o volumen de un objeto, primero dividiéndolo en partes pequeñas y luego sumándolas. Lo que muy pocos saben es que sus deberes de cálculo se originaron, en parte, en un debate entre dos eruditos del siglo XVII. En 1635, el matemático italiano Bonaventura Cavalieri afirmó que todo plano estaba compuesto por un número infinito de líneas paralelas y que todo sólido se hallaba formado por un infinito número de planos. Su «método de los indivisibles» acabó siendo un precursor del cálculo integral, pero antes tuvo que superar los ataques del matemático suizo Paul Guldin, en apariencia motivados por razones de tipo técnico. El historiador Amir Alexander, de la Universidad de California en Los Ángeles, ha encontrado motivos mucho más personales tras la disputa. En este avance de uno de los capítulos de su próximo libro, nos explica que Guldin y Cavalieri pertenecían a diferentes órdenes católicas y por eso discrepaban sobre cómo usar las matemáticas para entender la naturaleza de la realidad.

La crítica que Paul Guldin hizo a los indivisibles de Cavalieri se encuentra en el libro IV de su obra *De centro gravitatis*, publicada en 1641 y también conocida como *Centrobaryca*. Según Guldin, las demostraciones de Cavalieri no eran demostraciones constructivas del tipo aprobado por los matemáticos clásicos. Esto era indudablemente cierto: en la aproximación euclídea convencional, las figuras geométricas se construían paso a paso, de lo simple a lo complejo, con la única ayuda de una regla para las líneas rectas y de un compás para los círculos. Cada paso de la demostración conllevaba necesariamente una construcción de este tipo, seguida de una deducción de las implicaciones lógicas con relación a la figura resultante.

Cavalieri procedía al revés: partía de figuras geométricas ya construidas, como por ejemplo parábolas, espirales, etcétera, y luego las dividía en un número infinito de partes. Este método, que más que de «construcción» podríamos calificar de «deconstrucción», no tenía por objetivo armar una figura geométrica coherente, sino descifrar la estructura interna de una ya existente.



PLAMEN PETKOV

Guldin proseguía su crítica cuestionando el fundamento del método de Cavalieri: la idea de que un plano está formado por una infinitud de líneas, y un sólido por una infinitud de planos. Esta noción carecía por completo de sentido para Guldin, quien insistía en que «ningún geómetra concederá que la superficie sea o pueda describirse en lenguaje geométrico como "todas las líneas de una determinada figura"».

En otras palabras: puesto que las líneas no tienen anchura, ningún número de ellas puestas una al lado de otra llegaría a cubrir ni siquiera el más pequeño de los planos. Por consiguiente, el intento de Cavalieri de calcular el área de un plano a partir de las dimensiones de «todas sus líneas» era absurdo. De aquí Guldin pasaba a su argumento final: el método de Cavalieri consistía en establecer una proporción entre todas las líneas de una figura y todas las líneas de otra figura; pero ambos conjuntos de líneas, defendía Guldin, son infinitos, y no tiene sentido hablar de proporción entre una infinitud y otra. No importa cuántas veces uno multiplique un número infinito de indivisibles, estos jamás excederán ningún otro conjunto infinito de indivisibles.

Tomada en su conjunto, la crítica de Guldin al método de Cavalieri reflejaba los principios básicos de las matemáticas jesuitas. Tanto Christopher Clavius, el fundador de la tradición matemática jesuita, como sus sucesores en la orden creían que las matemáticas tenían que proceder de forma sistemática y deductiva en su descripción de las relaciones universales entre figuras, partiendo de postulados simples y llegando a teoremas cada vez más complejos. Las demostraciones constructivas encarnaban precisamente este ideal. Esta aproximación tuvo como resultado una lógica matemática rigurosa y jerárquica, que para los jesuitas era el motivo principal por el que merecía la pena estudiar este campo de conocimiento, pues demostraba cómo a partir de principios abstractos podía construirse, mediante una deducción sistemática, un mundo inamovible y racional cuyas verdades eran universales e incuestionables. En este aspecto, observaba Clavius, la geometría euclídea estaba más próxima al ideal jesuita de certeza, jerarquía y orden que cualquier otra ciencia. Por consiguiente, el énfasis de Guldin en las demostraciones constructivas no tenía que ver con la pedantería ni la obcecación, como pensaban Cavalieri y sus amigos, sino que era una expresión de convicciones profundamente arraigadas en su orden.

Lo mismo puede decirse de la crítica de Guldin a la división de planos y sólidos en «todas las líneas» y «todos los planos», respectivamente. Las matemáticas no solo tenían que ser jerárquicas y constructivas, sino también perfectamente racionales y libres de contradicción. Sin embargo, según Guldin, los indivisibles de Cavalieri eran intrínsecamente incoherentes, porque la idea de que el continuo estaba compuesto de indivisibles sencillamente no superaba el más mínimo escrutinio por parte de la razón. «Las cosas que no existen, ni podrían existir, no pueden ser comparadas», exclamaba, «y no es extraño, por consiguiente, que conduzcan a paradojas, contradicciones y, en última instancia, al error».



Amir Alexander es profesor de historia de las matemáticas en la Universidad de California en Los Ángeles, y autor de los libros *Geometrical landscapes: The voyages of discovery and the transformation of mathematical practice* (Stanford University Press, 2002) y *Duel at dawn: Heroes, martyrs, and the rise of modern mathematics* (Harvard University Press, 2010).

Para los jesuitas, este tipo de aproximación era mucho peor que abstenerse de practicar las matemáticas. Al fin y al cabo, el objetivo de las matemáticas era dotar al mundo de orden y estabilidad, mientras que el método de los indivisibles no traía consigo más que confusión y caos. Si se aceptaba este método defectuoso, las matemáticas ya no podrían ser el fundamento de un orden racional eterno. El sueño jesuita de una estricta jerarquía universal, tan incuestionable como las verdades de la geometría, estaría condenado al fracaso.

En sus obras, Guldin no mencionó los motivos filosóficos profundos que subyacían a su rechazo de los indivisibles, ni tampoco lo hicieron los matemáticos jesuitas Andrea Tacquet ni Mario Bettini, quienes, a su vez, atacaron el método de Cavalieri. En cierto pasaje, Guldin estuvo a punto de admitir que había cuestiones más importantes en juego que las estrictamente matemáticas, escribiendo crípticamente que «no pienso que el método [de los indivisibles] debiera rechazarse por razones que deben ser sofocadas por un nunca inoportuno silencio». Pero no dio ningún tipo de explicación de cuáles podrían ser esas «razones que deben ser sofocadas». En cuanto matemáticos, el cometido de los tres jesuitas no era atacar los indivisibles con argumentos filosóficos ni religiosos, sino con argumentos matemáticos. Si hubiesen anunciado que les animaban consideraciones de tipo teológico o filosófico, su reputación como matemáticos se habría resentido.

Quienes participaron en la batalla acerca de los indivisibles sabían perfectamente lo que de verdad estaba en juego, como dio a entender el matemático jesuato Stefano degli Angeli cuando escribió que no sabía «qué espíritu» animaba a los matemáticos jesuitas. Con muy pocas excepciones, sin embargo, el debate se circunscribió a las matemáticas y siguió siendo una controversia entre especialistas sobre qué procedimientos eran matemáticamente aceptables.

Cuando en 1642 Cavalieri tuvo noticia por primera vez de las críticas de Guldin, empezó a trabajar inmediatamente en una

EN SÍNTESIS

En el siglo XVII, el matemático italiano Bonaventura Cavalieri propuso que todo plano estaba formado por un número infinito de líneas, y todo sólido, por un número infinito de planos. Afirmó que estos «indivisibles» podían usarse para calcular longitudes, áreas y volúmenes, lo cual supuso un importante paso hacia el cálculo integral moderno.

El matemático suizo Paul Guldin, contemporáneo de Cavalieri, discrepó enérgicamente, criticando los indivisibles como algo contrario a la lógica. Sin embargo, el enfrentamiento estaba motivado por algo más que razones puramente matemáticas.

Ambos eran miembros de dos órdenes religiosas con un nombre parecido, pero de filosofías muy distintas: Guldin era jesuita, y Cavalieri, jesuato. El primero creía en el uso de las matemáticas para imponer una rígida estructura lógica a un universo caótico, mientras que el segundo estaba más interesado en seguir sus intuiciones para comprender el mundo en toda su complejidad.

refutación punto por punto. En un principio, su intención era responder en forma de un diálogo entre amigos, al estilo de su mentor, Galileo Galilei. Pero cuando Cavalieri le mostró un breve borrador a un amigo suyo, el también matemático Giannantonio Rocca, este se lo desaconsejó. Rocca le advirtió que era más prudente evitar el incendiario formato del diálogo, con su voluntad de dejar en evidencia a los demás y sus ocurrencias que con toda probabilidad enfurecerían a adversarios muy poderosos. Mucho mejor, aconsejó Rocca, sería escribir una réplica directa a las acusaciones de Guldin, concentrándose en las cuestiones estrictamente matemáticas y absteniéndose de provocaciones galileanas. Lo que Rocca no dijo es que Cavalieri no mostraba en sus escritos ni pizca del talento narrativo de Galileo, ni de su capacidad para presentar cuestiones complejas de una forma ingeniosa y divertida. Seguramente fue una suerte que Cavalieri siguiera el consejo de su amigo, ahorrándonos así un «diálogo» escrito en la prosa farragosa y casi indescifrable que lo caracterizaba. En vez de eso, incluyó la réplica a Guldin en su último libro sobre los indivisibles, *Exercitationes geometricae sex*, publicado en 1647, cuyo tercer «Ejercicio» se titulaba lisa y llanamente «In Guldinum» («Contra Guldin»).

Cavalieri no parecía excesivamente preocupado por la crítica de Guldin. Negaba haber dado por sentado que el continuo estuviese formado por un infinito número de partes indivisibles, argumentando que su método no dependía de este supuesto. Si se creía que el continuo estaba formado por indivisibles, entonces sí, «todas las líneas» juntas ciertamente sumaban una superficie, y «todos los planos», un volumen; pero si no se aceptaba que las líneas formaban una superficie, entonces sin duda había algo más, aparte de las líneas, que constituía las superficies, y algo más, aparte de los planos, que constituía los volúmenes. Sin embargo, nada de esto afectaba en absoluto al método de los indivisibles, que comparaba todas las líneas o todos los planos de una figura con los de otra, independientemente de si en realidad componían o no dichas figuras.

Puede que este argumento de Cavalieri fuese técnicamente aceptable, pero era también insincero. Cualquiera que hubiese leído su libro de 1635 *Geometria indivisibilibus*, o sus *Exercitationes*, no podía albergar ninguna duda de que partía de la intuición fundamental de que el continuo está compuesto de indivisibles. La petición de cuentas de Guldin a Cavalieri con relación a su punto de vista sobre el continuo estaba plenamente justificada, y la defensa del jesuato parece una excusa más bien pobre.

La respuesta de Cavalieri al énfasis de Guldin en que «un infinito no guarda proporción o razón con otro infinito» no fue mucho más convincente. Distinguió entre dos tipos de infinitud, afirmando que la «infinitud absoluta», efectivamente, no guardaba proporción con otra «infinitud absoluta», pero que la infinitud de todas las líneas y todos los planos no era absoluta, sino «relativa». Luego argumentó que este tipo de infinitud podía guardar —y de hecho guardaba— proporción con otra infinitud relativa. Como en el caso anterior, Cavalieri parecía estar defendiendo su método con abstrusos argumentos técnicos, que podían ser considerados aceptables, o no, por sus colegas de profesión. En ambos casos, su argumentación no tenía relación alguna con la verdadera motivación tras el método de los indivisibles.

Esa motivación salió a la luz en la respuesta de Cavalieri a la acusación de Guldin de que no «construía» sus figuras de forma adecuada. En este punto, a Cavalieri se le terminó la paciencia y mostró sus verdaderas cartas. Guldin había afirmado que, en una demostración geométrica, toda figura, ángulo y línea tienen que ser cuidadosamente construidos a partir de primeros principios. Cavalieri lo negó de plano. «Para que una demostración sea verdadera», escribió, «no es necesario describir *de facto* estas figuras análogas, sino que basta con presuponer que han sido descritas mentalmente».

He aquí la verdadera diferencia entre Guldin y Cavalieri, entre los jesuitas y los indivisibilistas. Para los jesuitas, el objetivo de las matemáticas era construir el mundo como un lugar inamovible y eternamente invariable donde el orden y la jerarquía nunca pudiesen ser cuestionados. Esta es la razón por la que todo objeto en el mundo debía ser construido cuidadosa y racionalmente, y por la que había que salir al paso de cualquier atisbo de contradicción y paradoja. Se trataba de una matemática «de arriba abajo», cuyo objetivo era aportar racionalidad y orden a un mundo que de otro modo sería caótico.

Para Cavalieri y el resto de indivisibilistas era exactamente al revés. Las matemáticas empezaban con una intuición material del mundo: las figuras planas están formadas por líneas, y los volúmenes, por planos; igual que una tela lo está por hilos entretejidos, y un libro, por páginas. No era necesario construir racionalmente estas figuras porque todos sabemos que ya existen en el mundo. Bastaba con darlas por supuestas y luego investigar su estructura interna. En caso de que surgieran paradojas y contradicciones aparentes, estas serían necesariamente superficiales, fruto de la limitación de nuestro entendimiento, y podrían ser o bien debidamente justificadas, o bien usadas como herramienta de investigación. Pero en ningún caso deberían impedirnos investigar la estructura interna de las figuras geométricas y las relaciones ocultas entre ellas.

Para los matemáticos clásicos como Guldin, la concepción de que las matemáticas podían basarse en una intuición vaga y paradójica era absurda. «¿Quién será el juez» de la verdad de una construcción geométrica, preguntaba socarronamente Guldin a Cavalieri, «la mano, el ojo o el intelecto?». Cavalieri, en cambio, pensaba que la insistencia de Guldin en evitar las paradojas no era más que pedantería inútil: todo el mundo sabía que las figuras existían, y no tenía ningún sentido sostener que no debería ser así. En opinión de Cavalieri, esta quisquillosidad podía acarrear serias consecuencias. Si Guldin se salía con la suya, no solo se perdería un método muy potente, sino que las propias matemáticas serían víctimas de una traición.

PARA SABER MÁS

The discovery of infinitesimal calculus. H. W. Turnbull en *Nature*, vol. 167, págs. 1048-1050, 30 de junio de 1951.

Leibniz. Frederick C. Kreiling en *Scientific American*, vol. 218, págs. 94-100, mayo de 1968.

New models of the real-number line. Lynn Arthur Steen en *Scientific American*, vol. 225, págs. 92-99, agosto de 1971.

Exploration mathematics: The rhetoric of discovery and the rise of infinitesimal methods. Amir R. Alexander en *Configurations*, vol. 9, n.º 1, págs. 1-36, 2001.

The skeleton in the closet: Should historians of science care about the history of mathematics? Amir Alexander en *Isis*, vol. 102, n.º 3, págs. 475-480, septiembre de 2011.

EN NUESTRO ARCHIVO

Una resolución de las paradojas de Zenón. William I. McLaughlin en *IyC*, enero de 1995.



Luis Cardona es profesor de zoología y miembro del Instituto para la Investigación de la Biodiversidad de la Universidad de Barcelona. Su investigación abarca diferentes aspectos de la biología marina, incluidas las relaciones entre las medusas y sus depredadores.

BIOLOGÍA MARINA

¿Por qué proliferan las medusas?

Si bien el declive de sus depredadores puede contribuir a tal crecimiento, la variabilidad climática ejercería una influencia mucho mayor

Luis Cardona

POR DESAGRADABLE QUE RESULTE NADAR ENTRE ELLAS, Y POR dolorosas que puedan ser sus picaduras, las medusas son un componente más del océano. En realidad, forman parte de la fauna marina desde el Precámbrico, hace unos 600 millones de años. Se encuentran en todos los océanos y algunas especies han colonizado también las aguas dulces. Pero, debido a la dificultad que entraña su estudio, hasta hace poco apenas habían despertado el interés de los biólogos marinos. Tal situación ha cambiado en las últimas décadas, al extenderse la idea de que las medusas y otros organismos del plancton gelatinoso están proliferando y aumentando su presencia en diferentes océanos. El fenómeno origina inquietud debido a las repercusiones negativas que conlleva para el turismo y la pesca.



PELAGIA NOCTILUCA **es la medusa más frecuente durante el verano en la mayor parte del Mediterráneo, y también la más urticante.**

Una de las causas que se ha presentado repetidamente para explicar las proliferaciones de medusas ha sido la sobrepesca. La captura de sus depredadores naturales, entre ellos la tortuga boba (*Caretta caretta*) y el pez luna (*Mola mola*), y la consiguiente disminución de las poblaciones de estos, habría reducido la presión que ejercen sobre el zooplancton gelatinoso. Un estudio detallado sobre la composición de la dieta de los posibles depredadores ha revelado que las medusas son consumidas por más organismos de lo que se pensaba. Pero, a pesar de que influyen sobre su abundancia, no se ha demostrado que su sobrepesca sea la responsable de las proliferaciones. La información disponible sugiere, en cambio, que al menos en el Mediterráneo, los factores climáticos ejercerían un papel mucho más determinante.

PROLIFERACIONES NOTABLES

A pesar de la ubicuidad de las medusas, hasta hace tres décadas la ecología marina las ignoraba. No solo a ellas, sino también a otros miembros del zooplancton gelatinoso, como los ctenóforos y las salpas. Todos estos organismos ocupaban un lugar destacado en los cursos de zoología básica; pero luego, al considerar el funcionamiento de los ecosistemas marinos, desaparecían del horizonte. La simetría radial de las medusas y las relaciones filogenéticas de las salpas fascinaban a los zoólogos. No obstante, apenas despertaban interés entre los ecólogos dedicados a estudiar el plancton, obsesionados, en cambio, por los copépodos y las diatomeas.

Aquel desprecio era el fruto de una aproximación sesgada al estudio de los habitantes de la columna de agua. La forma clásica de hacerlo consistía en realizar pescas con diferentes tipos de redes. Las mangas de plancton servían para muestrear las diatomeas, los dinoflagelados y los copépodos, mientras que las redes de arrastre pelágico eran útiles para capturar sardinas, calamares y gambas. Por ello, los ecólogos marinos clásicos se centraron en estas especies. En cambio, el zooplancton gelatinoso no se muestreaba bien con ninguno de ambos métodos, lo que llevó a la conclusión de que escaseaba y resultaba irrelevante desde un punto de vista ecológico. Hizo falta que alguien se dejara remolcar en aguas abiertas, equipado con un equipo de inmersión, para descubrir la verdadera abundancia de medusas, ctenóforos y salpas: el mar estaba lleno de ellos. Pero el factor decisivo que espoleó el interés por el zooplancton gelatinoso fue otro.

A principios de los años ochenta del siglo xx, cundió la alarma en las costas italianas debido a la aparición de grandes enjambres de *Pelagia noctiluca*, una escifomedusa de hasta 12 centímetros de diámetro, de color rosado o marrón, que infligía dolorosas picaduras. Aunque se trata de una especie propia del Mediterráneo y su abundancia oscila de forma periódica, la alarma fue tal que las Naciones Unidas organizaron un seminario dedicado exclusivamente a tratar sobre las causas de su aparente proliferación. Poco después, se alertó de la invasión del mar Negro por un ctenóforo de origen norteamericano y de graves cambios en el funcionamiento del ecosistema pelágico y la pesquería de anchoa. Simultáneamente, se publicaron datos sobre la mayor abundancia de medusas en el mar de Bering y en la corriente de Benguela, otras dos zonas sometidas a una importante presión pesquera.

La preocupación no dejaba de crecer. De ahí que el equipo de Josep Maria Gili, del Instituto de Ciencias del Mar del CSIC, en Barcelona, iniciara en 2000 la monitorización regular de la cantidad de medusas en las costas catalanas. Y entonces se produjo la catástrofe: entre 2003 y 2008, *P. noctiluca* proliferó de tal modo en todas las costas del Mediterráneo español que los servicios de salvamento de las playas se vieron obligados a diseñar una nueva bandera de alerta para comunicar la presencia de medusas a los bañistas.

Según la opinión de ecologistas y de algunos biólogos, se había producido un cambio de estado en el ecosistema pelágico del Mediterráneo, que había pasado de estar dominado por grandes peces como el atún rojo a estarlo por las medusas. La causa última de la proliferación se atribuía a la escasez de depredadores naturales, provocada a su vez por la contaminación y la sobrepesca. La alarma fue tal que incluso se iniciaron programas de translocación de tortugas marinas para intentar contener la plaga. Centenares de huevos de tortuga boba fueron transportados desde las playas de puesta en Cabo Verde hasta las playas de Andalucía y Canarias; el objetivo consistía en incubarlos allí para que, después de cierto tiempo, las tortugas adultas regresaran a esas mismas playas para reproducirse. Se esperaba frenar así el avance de las medusas a largo plazo.

Pero, antes de que tal intervención pudiera notarse, llegó el verano de 2009 y las medusas habían desaparecido. ¿Qué había sucedido?

PERSPECTIVA HISTÓRICA

Los humanos percibimos la naturaleza como algo casi inmutable, que fluctúa únicamente siguiendo ritmos predecibles causados por las mareas y las estaciones. Se trata de una percepción errónea, fruto, en gran parte, de la longevidad de los árboles y de la lentitud a la que operan los procesos geológicos mientras transcurren nuestras vidas.

Pero si hay algún ecosistema dinámico, variable y poco predecible, este es el pelágico. Además, la mayor parte de las especies que lo habitan poseen ciclos biológicos muy cortos y su éxito reproductivo está muy vinculado a las condiciones oceanográficas, dependientes a su vez de la variabilidad climática. Ello implica la existencia de importantes variaciones anuales en la abundancia de la mayor parte de los organismos pelágicos, entre ellos el zooplancton gelatinoso. Tales cambios se producen también en *P. noctiluca*, que en el Mediterráneo presenta dos generaciones anuales, aunque la longevidad individual puede alcanzar los ocho meses.

La primera prueba de la proliferación cíclica de *P. noctiluca* fue publicada en 1989, en la revista *Deep Sea Research*, por Jacqueline Goy, del Museo de Historia Natural de París, Pierre Morand, de la Estación Zoológica de Villefranche-sur-Mer, y

EN SÍNTESIS

Durante la última década se ha extendido la idea de que las medusas están proliferando en diferentes océanos. La sobrepesca de sus depredadores naturales se ha presentado repetidamente como una de las causas del fenómeno.

Aunque el estudio de la composición de la dieta de los depredadores potenciales revela que el zooplancton gelatinoso es consumido por diversos animales marinos, no se ha podido demostrar que el declive de estos sea responsable de las proliferaciones.

En cambio, la información disponible sugiere que, al menos en el Mediterráneo, los factores climáticos resultarían mucho más decisivos.



DURANTE LA ÚLTIMA DÉCADA se ha extendido la idea de que la sobrepesca de tortugas marinas, como la tortuga boba, y otros depredadores oceánicos ha causado la proliferación de medusas.

Michèle Etienne, de la Universidad de París VII. A raíz del seminario organizado por las Naciones Unidas, decidieron revisar durante meses toda la bibliografía que tratara sobre la presencia de *P. noctiluca* en el norte del Mediterráneo occidental, incluidos los registros de la propia Estación Zoológica de Villefranche-sur-Mer y numerosas publicaciones de los siglos XVIII y XIX. De este modo, lograron remontarse hasta 1775 y reconstruir una serie de más de dos siglos en que cada año se clasificaba «de medusas» o «sin medusas». Gracias a ello, identificaron que las proliferaciones se producían cada 12 años, en promedio, aunque ese intervalo resultaba muy variable. En general, *P. noctiluca* se detectaba en años caracterizados por primaveras y veranos secos, cálidos y con elevada presión atmosférica.

Esos resultados, basados en datos cualitativos, fueron luego confirmados por Juan Carlos Molinero, Frédéric Ibanez y Paul Nival, de la Estación Zoológica de Villefranche-sur-Mer, con la colaboración de Emmanuelle Buecher, de la Universidad del Cabo Occidental, y Sami Soussi, de la Universidad de Ciencias y Tecnología de Lille, en un artículo publicado en 2005 en *Limnology and Oceanography*. El muestreo semanal de plancton realizado entre 1966 y 1993 por el personal de la Estación Zoológica de Villefranche-sur-Mer permitió demostrar un fuerte vínculo entre la llamada Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y la abundancia de zooplancton gelatinoso y copépodos en el norte del Mediterráneo occidental. En esencia, la NAO mide la variación de la potencia relativa del anticiclón de las Azores frente a la zona de bajas presiones situada sobre Islandia. Cuando el anticiclón de las Azores es muy potente, las borrascas atlánticas se desvían hacia el norte de Europa, lo que provoca inviernos secos y cálidos en el Mediterráneo y favorece el desarrollo de ciertas especies.

Por tanto, la proliferación observada a principios de los años ochenta no resultaba anómala. En realidad, no se trataba de un problema ecológico, sino de una simple falta de memoria. Durante veinte años, las condiciones ambientales no habían favorecido el crecimiento de *P. noctiluca* en el Mediterráneo, salvo en 1969 y 1970. Además, ese período de escasez de medusas había coincidido con el auge del turismo de masas. De ahí que el crecimiento de *P. noctiluca* de los ochenta se considerara algo inédito. Pero tras la publicación del artículo de Goy y sus colaboradores debería haber quedado claro que sucesos como aquel iban a repetirse de forma periódica. Nuevamente, la memoria volvió a fallar y durante la proliferación de 2003 a 2008 pocos se acordaron del trabajo de los investigadores franceses. Se volvió a invocar la sobrepesca como motivo de la abundancia de medusas, aunque en realidad no se sabía gran cosa sobre sus depredadores.

UN PLATO MUY SOLICITADO

Hasta hace poco, la mayor parte de los biólogos marinos creían que únicamente el pez luna y las tortugas marinas consumían zooplancton gelatinoso de forma habitual. En consecuencia, solo estas especies podían ejercer algún control sobre la dinámica de las poblaciones de medusas. Esta creencia se basaba en dos elementos. Por una parte, rara vez se detectan medusas en los contenidos estomacales de depredadores marinos; por otra, no resulta extraño observar al enorme pez luna, a la tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*) y a la tortuga boba alimentarse de medusas mientras flotan, indolentes, en la superficie del océano.

Como las poblaciones de tortugas marinas habían menguado en gran parte del mundo durante la segunda mitad del siglo XX, resultaba tentador ligar dicho declive con la proliferación de medusas. Pero este razonamiento olvidaba que los depredadores oportunistas (los que consumen una gran variedad de alimentos) influyen más sobre el número de sus presas que los depredadores especialistas, ya que los últimos simplemente se mueren de hambre cuando reducen demasiado las poblaciones de sus presas. Por tanto, siempre van a remolque de aquellas, como sucede con las liebres y los linces de los bosques boreales. Si, además, tenemos en cuenta que *P. noctiluca* produce dos generaciones anuales en el Mediterráneo y que las tortugas bobas no alcanzan la madurez sexual antes de los 20 o 30 años, dependiendo de la población de origen, difícilmente se hallarán sincronizados los ciclos de ambas especies. Por desgracia, sabemos demasiado poco sobre la biología del pez luna en el Mediterráneo como para aventurar nada sobre su posible papel en el control de las poblaciones de medusas, aunque también parece ser un depredador especialista con un ciclo de vida demasiado largo como para ejercer un control efectivo.

Por otra parte, en 1993 G. Richard Harbison, de la Institución Oceanográfica de Woods Hole en Massachusetts, redactó un informe para el Consejo Internacional para la Exploración del Mar (ICES) donde proponía que si algún organismo podía influir sobre la abundancia de zooplancton gelatinoso, debía tratarse de peces capaces de alimentarse de otras presas; de verdaderos oportunistas que consumían en cada momento el recurso más abundante, incluidas las medusas. Estudios posteriores han demostrado que, en efecto, ciertas especies de peces pueden nutrirse de zooplancton gelatinoso, pero la identificación de los posibles consumidores de medusas se ha visto lastrada por problemas metodológicos.

La forma habitual de estudiar la dieta de un depredador consiste en examinar el contenido de su estómago. Aunque este método nos ha permitido aprender mucho sobre el funcionamiento de las redes tróficas marinas, al menos tres inconvenientes lo hacen inadecuado para detectar, y mucho menos cuantificar, el

PRINCIPALES REPRESENTANTES

Componentes del plancton gelatinoso

El plancton gelatinoso está formado por un conjunto heterogéneo de animales de cuerpo transparente y natación lenta que se desplazan a la deriva con las corrientes marinas. La similitud morfológica de sus componentes es el resultado de un proceso de convergencia adaptativa, fruto de la presión selectiva por minimizar las posibilidades de ser detectado por los depredadores en un medio donde no existe refugio alguno. Aunque son muchos los grupos animales con representantes en el plancton gelatinoso, tres de ellos destacan tanto por el número de especies como por su importancia en términos de biomasa: los cnidarios, los ctenóforos y las salpas.

Los cnidarios son organismos de simetría radial, formados por dos capas de tejido y una cavidad gastrovascular abierta al exterior por un único orificio, rodeado de tentáculos. Estos últimos presentan células urticantes, denominadas cnidoblastos, que aturden y matan a las presas. Sin embargo, algunos cnidarios, como *Cotylorhiza tuberculata*, viven en simbiosis con algas microscópicas, de las que obtienen gran parte del carbono orgánico. De ahí que dispongan de pocas células urticantes en los tentáculos.

En el ciclo biológico de la mayor parte de las especies de cnidarios se alternan dos generaciones de individuos morfológicamente distintos: los pólipos y las medusas [*véase* «La metamorfosis de una medusa» por U. Tilves, V. Fuentes y D. Atienza; Investigación y Ciencia, diciembre de 2008]. La fase de pólipo vive fija al sustrato y se reproduce asexualmente, dando lugar a pequeñas medusas de vida libre denominadas éfiras. Estas, al crecer, se convierten en medusas adultas, capaces de reproducirse sexualmente para generar larvas plánula, que al fijarse al sustrato darán lugar a la siguiente generación de pólipos.

La mayor parte de las medusas responsables de proliferaciones en el Mediterráneo son cnidarios de la clase Escifozoos, caracterizada por la existencia de pólipos solitarios de vida corta. Esto hace que a lo largo del año se sucedan una generación de pólipos, típicamente invernal, y otra de medusas estival. Es el caso de *Cotylorhiza tuberculata* y de *Rhizostoma pulmo*. En cambio, *Pelagia noctiluca* ha perdido la fase de pólipo y las larvas se transforman directamente en éfiras. Por este motivo es posible encontrar medusas de *Pelagia noctiluca* durante todo el año.



Cotylorhiza tuberculata es un cnidario que posee zooxantelas, unas algas endosimbióticas que le proporcionan la mayor parte del carbono orgánico que necesita.

consumo de zooplancton gelatinoso. En primer lugar, el análisis de contenidos estomacales tiende a sobrestimar la importancia de las especies presa con partes esqueléticas duras, como los peces, y a subestimar la de los organismos carentes de ellas, como las medusas, las salpas y los ctenóforos. Esto sucede porque las presas blandas se digieren con rapidez y, por tanto, no queda rastro de ellas al poco de haber sido ingeridas. En segundo lugar, muchos peces poseen dientes en el paladar y otras partes de la cavidad oral, los cuales rasgan con facilidad los delicados tejidos de las medusas. Por último, la congelación reduce las medusas a una masa informe, por lo que este procedimiento de conservación hace imposible detectar las que pudieran haber sido ingeridas.

NIVELES TRÓFICOS

Por todo ello, y aprovechando el interés suscitado por la proliferación de *P. noctiluca*, nuestro grupo decidió investigar hasta qué punto el consumo de medusas era habitual entre los depredadores pelágicos del Mediterráneo occidental. Para tal fin, optamos por emplear isótopos de carbono y nitrógeno a modo de trazadores. Estos dos elementos químicos presentan en la naturaleza dos isótopos estables cada uno de ellos, siendo el isótopo ligero (^{12}C y ^{14}N, respectivamente) mucho más frecuente que el pesado (^{13}C y ^{15}N). La abundancia de los isótopos estables de carbono y nitrógeno en una muestra se expresa mediante los parámetros $\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$, que corresponden a la cantidad relativa del isótopo pesado en la muestra en comparación con la cantidad relativa en un estándar de referencia.

Lo importante es que las relaciones isotópicas en los tejidos de un depredador reflejan las de los tejidos de sus presas. En consecuencia, una vez determinados esos valores en el depredador y las presas potenciales, es posible estimar la contribución relativa de cada presa a la dieta mediante la utilización de un algoritmo conocido como modelo de mezcla. Obviamente, el método solo funciona si las presas potenciales difieren en sus razones isotópicas y si conocemos el modo en que dichas razones se modifican

Los cnidarios de la clase Hidrozoos se caracterizan por presentar pólipos coloniales de carácter perenne y medusas de vida corta. Las hidromedusas suelen ser de pequeño tamaño y por ello pasan inadvertidas, salvo en el caso de *Aquorea forskalea*, que puede alcanzar los 10 centímetros de diámetro y ser muy abundante a finales de primavera. Pero el hidrozoo que predomina en primavera es *Velella velella*. En esta especie, las colonias de pólipos son de vida libre y presentan un esqueleto córneo en forma de vela que sobresale de la superficie del agua. Estas colonias están presentes durante todo el año, pero en ocasiones se desarrollan enormemente a finales de primavera y se acumulan después en las playas. En cambio, las medusas son muy pequeñas y difíciles de detectar.

Los ctenóforos también están formados por dos capas de tejido, pero a diferencia de los cnidarios, no presentan células urticantes, sino adhesivas. Además, su cuerpo está recubierto por ocho bandas de paletas natatorias. En el Mediterráneo, los ctenóforos suelen escasear, si bien en primavera pueden proliferar los géneros *Beroe* y *Pleurobranchia*. No obstante, el verano de 2009 se observó el crecimiento de *Mnemiopsis leidyi* en Israel, Italia y España. Se trata de una especie de origen americano introducida en el mar Negro en la década de los ochenta.

Las salpas son animales de simetría bilateral pertenecientes al grupo de los cordados y, por tanto, emparentadas con los vertebrados, a pesar de su cuerpo globoso y transparente. Presentan alternancia de generaciones, con individuos solitarios de reproducción asexual; estos originan por gemación cadenas de decenas de zooides capaces de reproducirse sexualmente. A diferencia de lo que sucede con las medusas, su proliferación se produce cuando la mezcla vertical de la columna de agua es intensa, por lo que suelen abundar en primavera, especialmente los años fríos y ventosos. Además, realizan importantes migraciones verticales, alcanzando profundidades de 700 metros. *Thalia democratica* y *Salpa fusiformis* son las dos especies más frecuentes en las aguas costeras del Mediterráneo.



Los ctenóforos se hallan dotados de ocho bandas de paletas natatorias y de células adhesivas. A pesar de su semejanza con las medusas, no están emparentados con ellas.



Las salpas, emparentadas con los vertebrados, proliferan sobre todo en primavera, en condiciones de fuerte mezcla vertical de la columna de agua.

durante la digestión, absorción y metabolización de los nutrientes. Contamos con los datos suficientes para utilizar los isótopos estables como trazadores de la alimentación, aunque siempre se requiere interpretar la información con cautela.

Un punto clave del análisis radica en que la abundancia del isótopo pesado de nitrógeno aumenta a lo largo de la red trófica debido a que los organismos excretan, de forma preferente, compuestos nitrogenados portadores de ^{14}N. El parámetro δ^{15}N constituye, pues, un buen indicador de su posición en la red trófica (nivel trófico). Afortunadamente, disponíamos de una buena información de base sobre la dieta de la mayor parte de las especies estudiadas, gracias al análisis de contenidos estomacales realizados en estudios previos. De este modo, pudimos determinar cuál sería el nivel trófico esperado de cada depredador en caso de no consumir zooplancton gelatinoso y compararlo con el nivel trófico realmente observado mediante el análisis de isótopos estables. En algunas especies, como el rorcual común (*Balaenoptera physalus*), el bonito (*Sarda sarda*), la anjova (*Pomatomus saltatrix*), el palometón (*Lichia amia*), la tintorera (*Prionace glauca*) y el delfín listado (*Stenella caeruleoalba*), el valor de δ^{15}N observado se ajustaba bien al esperado, de acuerdo con el análisis de contenidos estomacales. Ello permitía excluir a cualquier especie de zooplancton gelatinoso como un componente relevante de la dieta. Pero en otros casos, el nivel trófico observado era muy inferior al esperado, lo que sugería un consumo importante de medusas u otras especies del zooplancton gelatinoso.

Aplicamos entonces un modelo de mezcla denominado SIAR (*Stable Isotope Analysis in R).* Sus principales ventajas frente a otros modelos son que permite incorporar la variabilidad en las razones isotópicas, tanto del depredador como de las presas potenciales, y que calcula el intervalo de credibilidad de las estimas. Para algunas especies, como las lechas jóvenes (*Seriola dumerili*) o la llampuga (*Coryphaena hippurus*), los resultados fueron ambiguos; el nivel trófico observado podía explicarse simplemente mediante una dieta basada en crustáceos, peces y cefalópodos,

¿Quién se alimenta de las medusas?

Para determinar si la dieta de ciertos depredadores, como la tortuga boba, se basa sobre todo en medusas y otros organismos del zooplancton gelatinoso, se analiza la abundancia relativa de los isótopos pesados de carbono ($\delta^{13}C$) y nitrógeno ($\delta^{15}N$) en los tejidos del depredador y de sus posibles presas. Tales valores son característicos de cada especie, lo que permite utilizarlos como trazadores en el estudio de redes tróficas. De este modo, la abundancia relativa de los isótopos en la tortuga boba son un reflejo de la cantidad y el tipo de presas que consume.

Se sabe que los valores $\delta^{15}N$ y $\delta^{13}C$ aumentan en los niveles superiores de las redes tróficas, es decir, son superiores en los depredadores (como el bonito, el atún y el pez luna) que en las presas. La gráfica muestra cómo bastaría una dieta de peces para explicar los altos valores observados en el bonito, mientras que los valores relativamente bajos del atún rojo y el pez luna, inferiores a lo que les correspondería por el nivel trófico que ocupan, se atribuirían al consumo de medusas (zooplancton gelatinoso).

sin incluir medusas o salpas, pero tampoco podíamos excluir el consumo de estas. En otras especies, como las tortugas bobas oceánicas, el pez luna, el atún rojo (*Thunnus thynnus*), la bacoreta (*Euthynnus alleteratus*) y el marlín mediterráneo (*Tetrapturus belone*), la ingestión de medusas y salpas era la única explicación posible del bajo nivel trófico observado, pues la señal isotópica de los pocos crustáceos que aparecían en sus estómagos no bastaba para justificar los resultados obtenidos. Por tanto, existían otras especies, más allá de la tortuga boba y del pez luna, que se alimentaban de cantidades importantes de zooplancton gelatinoso. En el caso de un atún rojo de 100 kilogramos, este podía representar hasta el 60 por ciento de la materia orgánica asimilada diariamente, lo que implicaría el consumo de hasta 15 kilogramos diarios de zooplancton gelatinoso.

De todos modos, el método presentaba limitaciones y los intervalos de credibilidad de los resultados proporcionados por el modelo de mezcla eran muy amplios. Ello se debía a que las diferencias entre las razones isotópicas de las medusas y de las salpas son pequeñas, aunque estadísticamente significativas y biológicamente relevantes. Al ser *P. noctiluca* una especie urticante, podríamos pensar que sería la menos vulnerable y que las salpas constituirían la mayor fuente de zooplancton gelatinoso. De ser cierto, los depredadores mencionados podrían ejercer un impacto sobre la población de salpas, pero no sobre la de *P. noctiluca*, el verdadero objeto de preocupación para bañistas y hoteleros. Sin embargo, recientes observaciones demuestran que no es así; incluso peces demersales (los que viven cerca del fondo) como el sargo (*Diplodus sargus*) y la chopa (*Spondyliosoma cantharus*) depredan a *P. noctiluca* al acercarse a la costa. De todos modos, sería necesario observar a los atunes nadando a través de enjambres de medusas para documentar su comportamiento alimentario y confirmar así el consumo de *P. noctiluca*.

CORTESÍA DE LUIS CARDONA

¿SOBREPESCA O CAMBIO CLIMÁTICO?

Nuestros resultados sugieren que el plantel de consumidores de zooplancton gelatinoso es más amplio de lo que se pensaba al principio e incluye especies fuertemente explotadas, como el atún rojo. Sin embargo, no creemos que pueda culparse a la sobrepesca de la proliferación de *P. noctiluca* observada entre 2003 y 2008. En primer lugar, porque todavía no disponemos de ningún modelo demográfico que nos permita simular el papel de la depredación en la dinámica de la población de medusas. Y en segundo lugar, porque el cese de la proliferación de *P. noctiluca* a partir de 2009 no puede haber sido causado por la ligera recuperación de la población de atún observada a partir de los cambios impuestos en la pesquería un año antes.

Además, en el mar Negro y en Namibia ha sido la sobrepesca de pequeños peces pelágicos la responsable de la proliferación de medusas, pues aquellos son al mismo tiempo competidores y depredadores de larvas de medusa. En el Mediterráneo occidental se ha producido un declive de las poblaciones de sardina (*Sardina pilchardus*) y anchoa (*Engraulis encrasicolus*), pero desconocemos hasta qué punto estas especies interaccionan con el zooplancton gelatinoso. Tampoco sabemos mucho sobre la dinámica de las poblaciones de peces mesopelágicos, como los mictófidos o peces linterna. Estas especies habitan entre los 200 y 1000 metros de profundidad en los océanos y presentan una enorme biomasa, por lo que tenderán a influir más sobre *P. noctiluca* que las sardinas y las anchoas, al ser esta una medusa eminentemente oceánica.

En cambio, el conjunto de los datos disponibles indica que la proliferación de *P. noctiluca* en el Mediterráneo occidental estaría causada sobre todo por factores climáticos. Lo mismo sucedería con la mayor abundancia de *Cotylorhiza tuberculata* observada en el mar Menor, según apuntan los trabajos de Diana Astorga, Javier Ruiz, Gabriel Navarro y Laura Prieto, del Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía, del CSIC. Es posible que la sobrepesca de competidores y depredadores facilite el crecimiento de estas especies una vez las condiciones ambientales se vuelven favorables. Pero el desencadenante último serían las condiciones oceanográficas asociadas a una primavera seca y cálida, lo que se traduce en una temperatura más elevada y una menor mezcla vertical. En este contexto, el cambio climático podría incrementar la frecuencia de proliferaciones de medusas, debido no solo a la mayor temperatura de las aguas superficiales, sino también a una mayor duración de la fase de estratificación térmica estival de la columna de agua. Esta última se produce cuando el calentamiento del agua superficial reduce tanto su densidad que flota sobre las capas inferiores, más frías y densas, sin que el viento pueda forzar su mezcla. Tales condiciones favorecen el crecimiento de *P. noctiluca* en particular.

En 2010, Tjaša Kogovšek, Branko Bogunović y Alenka Malej, del Instituto Nacional de Biología de Eslovenia, publicaron en *Hydrobiologia* el análisis de una serie temporal de la abundancia de medusas registrada durante 200 años en el mar Adriático. Los datos allí expuestos apoyarían la hipótesis de que el cambio climático fomentaría el desarrollo del zooplancton gelatinoso. Se observó que, durante la segunda mitad del siglo xx, el tiempo transcurrido entre dos proliferaciones consecutivas de medusas en esa región se había reducido de 12 a 8 años. Por desgracia, en pocos lugares existen series de datos lo suficientemente largas como para determinar si se trata de un patrón general.

En cualquier caso, se requieren nuevas investigaciones para determinar con mayor detalle el efecto de la sobrepesca y del cambio climático en la dinámica de las poblaciones de medusas. Necesitamos, entre otras cosas, modelos demográficos y de la estructura de las redes tróficas pelágicas. Solo así podremos dar una respuesta adecuada a la preocupación generada por las proliferaciones masivas de medusas. Durante el último episodio, ante las preguntas de políticos y periodistas solo podíamos balbucear meras hipótesis. Ahora sabemos mucho más y podemos explicar el origen del fenómeno, pero no aportar remedios. Quizá nunca los hallemos, pero lo cierto es que los fondos destinados al estudio de las proliferaciones de medusas desaparecieron junto al último de los enjambres de *P. noctiluca*. Cuando se produzca una nueva crisis, políticos y periodistas volverán a llamar pidiendo soluciones. Por el momento, solo podremos recomendarles paciencia.



A PESAR DE SU CARÁCTER URTICANTE, los peces demersales como el sargo (*arriba a la izquierda*) y la chopa (*resto de los individuos*) depredan a la medusa *Pelagia noctiluca* cuando se acerca a la costa. La mayor parte de los ataques se dirigen a la parte aboral de la umbrela, libre de células urticantes, pero los peces también mordisquean los tentáculos.

CORTESÍA DE MANUEL ELICES

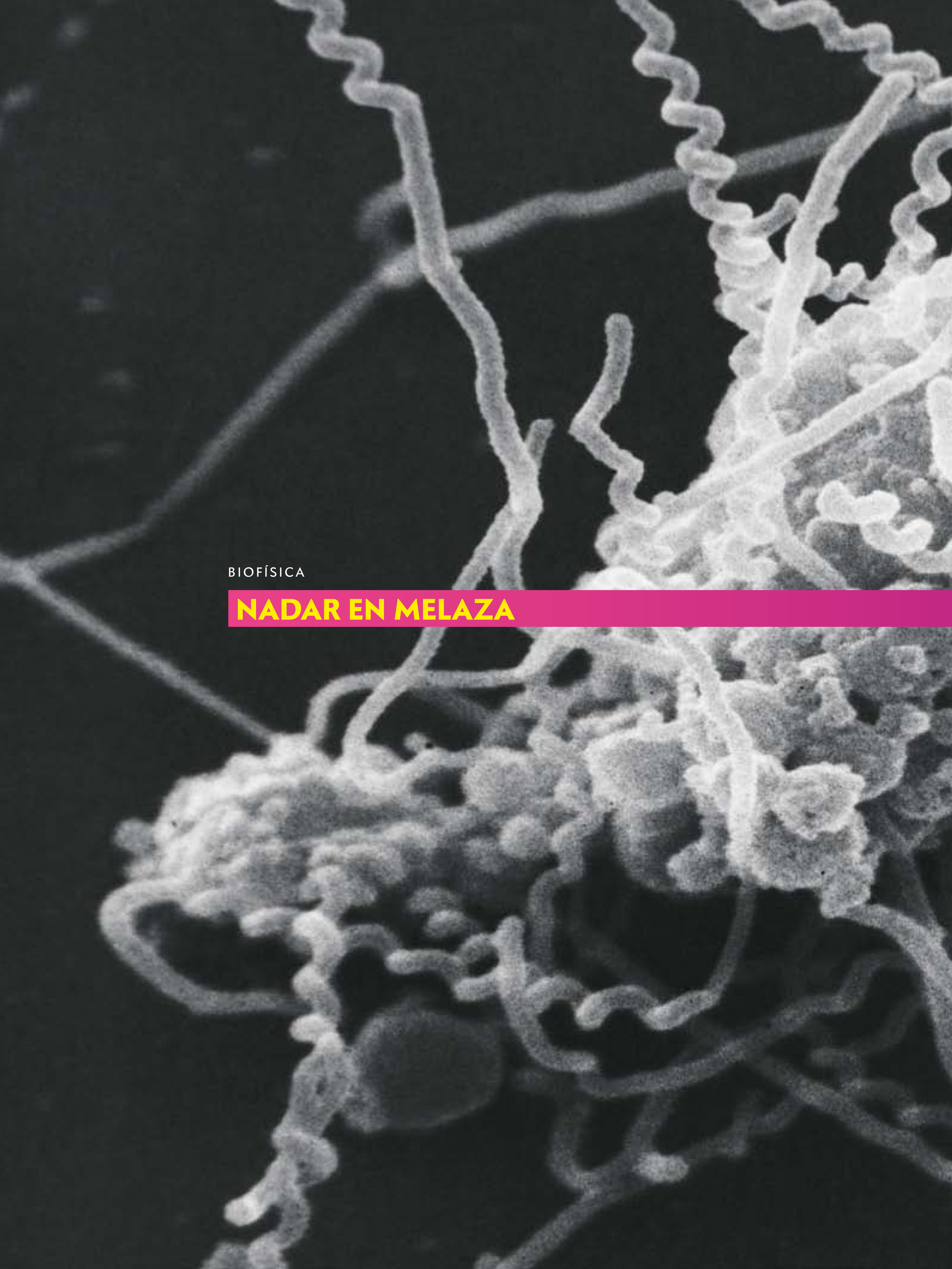
PARA SABER MÁS

The jellyfish joyride: causes, consequences and management responses to a more gelatinous future. A. J. Richardson et al. en *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 24, págs. 312-322. 2009.

Environmental control of phase transition and polyp survival of a massive-outbreaker jellyfish. L. Prieto et al. en *PLoS ONE*, vol. 5, n.º 11, pág. e13793, 2010.

Massive consumption of gelatinous plankton by Mediterranean apex predators. L. Cardona et al. en *PLoS ONE*, vol. 7, n.º 3, pág. e31329, 2012.

Temperature effects on asexual reproduction rates of scyphozoan species from the northwest Mediterranean Sea. J. E. Purcell et al. en *Hydrobiologia*, vol. 690, págs. 169-180, 2012.



BIOFÍSICA

NADAR EN MELAZA



Para algunas de las criaturas más diminutas y abundantes del mundo, moverse por el agua constituye una hazaña de enorme dificultad

Ferris Jabr

LAS BACTERIAS del género *Spiroplasma*, que se parecen a un sacacorchos, retuercen su cuerpo sin pausa para nadar por los fluidos de las plantas y los insectos a los que infectan.

El 15 de enero de 1919, justo cuando Martin Clougherty se levantaba de la siesta, una imponente muralla de melaza se estampó contra su cuarto. Lo mandó hasta la mitad de la calle. Maltrecho pero consciente, se las arregló para quitarse de los ojos gruesos grumos pringosos y mantenerse erguido en esa especie de lodo pegajoso que corría a su alrededor, un mar de fluido ámbar y espeso que arrastraba los astillados despojos de su casa. Se arrojó sobre una balsa de residuos que pasaba ante él (la armazón de su cama) y atisbó una mano que apenas sobresalía del légamo. La tomó y tiró hasta subir a la balsa a una mujer que daba boqueadas: su hermana Teresa.



EL DESASTRE DE 1919 por la inundación con melaza en el North End de Boston.

A menos de treinta metros de la casa de los Clougherty, un desvencijado tanque de almacenamiento de melaza, alto como una casa de cinco pisos y lleno casi a rebosar, acababa de reventar. Había soltado más de siete millones de litros de melaza a las calles del North End, un barrio de Boston. Una ola de siete metros y medio de altura y 50 de ancho en su máximo demolió edificios, aplastó vagones de mercancías y arrancó de sus cimientos el cuartel de bomberos mecanizados número 31. El segundo piso de este edificio cayó sobre el primero, de manera que atrapó a varios bomberos y a un cantero en un espacio donde apenas si podían erguirse. Los fornidos hombres trataron de avanzar por la melaza como si se tratara de agua, pero cada movimiento de las piernas les requería un enorme esfuerzo. Uno de los bomberos se ahogó, agotado. El desastre se llevó la vida de 21 personas e hirió a otras 150, muchas de las cuales fueron engullidas por el aluvión y necesitaron de la ayuda de otros para liberarse porque por sí mismos les hubiera sido imposible, tal como describe detalladamente Stephen Puleo en su libro *Dark tide* [«Marea oscura»] (Beacon Press, 2003).

Desde el punto de vista de un ser humano, una ola de melaza es un suceso de lo más raro, algo tan estrafalario que al principio resulta difícil de creer. Pero para algunas de las formas de vida más abundantes del planeta, sin embargo, empantanarse en melaza es cosa de cada momento. Al ser tan diminutos, muchas bacterias y paramecios, y otros microorganismos, se pasan la vida forcejeando con el agua como las personas se las verían y se las desearían en la melaza. O peor aún: las bacterias se enfrentan a fuerzas viscosas millones de veces superiores a las que se desencadenaron en Boston en 1919.

Para superar estas penalidades, los microorganismos han desarrollado sus propias y únicas formas de moverse, complejas y excéntricas. Las bacterias y otras clases de vida minúsculas no es que naden, es que empujan y tiran, se crispan y salen disparadas, rotan y actúan como sacacorchos para abrirse camino a través de fluidos y sobre superficies untadas con sustancias viscosas. La mayoría de los microbios se sirven de apéndices bien palmarios para desplazarse, pero ciertas criaturas minúsculas han desconcertado durante decenios a los científicos porque esconden sus trucos. En estos últimos años, gracias a la ayuda de cámaras y microscopios cada vez más potentes, los biólogos han resuelto algunos de estos misterios contumaces y han descubierto una gama de adaptaciones hasta ahora desconocidas. Se ha visto que incluso algunas especies de microbios profusamente estudiadas se desplazan de maneras que habían pasado inadvertidas. Las nuevas investigaciones han sacado a la luz complejos motores proteínicos ocultos en el interior de células bacterianas, enzimas que para facilitar el avance diluyen las sustancias viscosas en el entorno del microorganismo conforme se desplaza por él, y una bacteria que utiliza una especie de arpeos, de dragas con garfios en miniatura, para catapultarse a través del fluido.

«Si el mundo repentinamente se cubriera de melaza, la gente se encontraría con un grave problema», asegura Jacinta Conrad, que estudia bacterias y fluidos complejos en la Universidad de

EN SÍNTESIS

En enero de 1919, un desvencijado depósito de melaza reventó. Una enorme ola de fluido viscoso arrasó las calles del barrio de North End, en Boston. Se tragó a personas y animales, que no podían liberarse sin ayuda.

Por sus minúsculas dimensiones, las bacterias y otros microbios se mueven por el agua y otros fluidos como nosotros por la melaza. La mayoría resuelve este problema con potentes colas que recuerdan a látigos o con numerosos y diminutos pelos que mueven como remos.

Algunos microorganismos, sin embargo, han desconcertado a los científicos durante años, pues nadaban sin ningún apéndice externo manifiesto. Recientemente, se han ido resolviendo algunos de estos misterios con el descubrimiento de adaptaciones hasta ahora desconocidas; por ejemplo, motores proteínicos o enzimas que licúan el légamo.

PÁGINAS ANTERIORES: DAVID M. PHILIPS, SCIENCE SOURCE; CORTESÍA DE LA BIBLIOTECA PÚBLICA DE BOSTON (*inundación*)





CONFORME VA NADANDO POR EL MOCO, ***Helicobacter pylori*** **(*izquierda*) convierte un gel casi sólido en un líquido mucho menos espeso. La bacteria del suelo *Myxococcus xanthus* (*derecha*) usa un motor proteínico para deslizarse sobre superficies sin servirse de apéndices externos; algunas bacterias marinas, que igualmente carecen de tales miembros, puede que hagan lo mismo.**

KLAUS BOLLER, SCIENCE SOURCE (*Helicobacter pylori*); SCIENCE SOURCE (*Myxococcus xanthus*)

Houston. «Pero las bacterias se reproducen con rapidez y tienen facilidad para adaptarse, factores que les han conferido la capacidad de conquistar el planeta. Si no poseen los apéndices o instrumentos convenientes para moverse por los fluidos, hay una gran probabilidad de que algunos individuos de su progenie los tengan en el futuro cercano.»

UNA SITUACIÓN PEGAJOSA

Las bacterias inmersas en el agua y los seres humanos sumergidos en la melaza se encuentran más o menos en la misma pegajosa situación. Se puede predecir la facilidad con que una bacteria, una persona o cualquier otro ser vivo se moverá en el seno de un fluido calculando el número de Reynolds pertinente, que en este caso tiene en cuenta la viscosidad y la densidad del fluido, así como la velocidad y el tamaño del organismo. Cuanto más alto sea este parámetro, más probable es que todo le vaya como pez en el agua.

En la mayoría de las situaciones, los nadadores humanos disfrutan de un número de Reynolds muy alto. Para un adulto en el agua, por ejemplo, está en torno a un millón. Por el contrario, muchos nadadores microscópicos habitan siempre un mundo de bajos números de Reynolds, como explicó en 1974 el físico Edward Mills Purcell en su famosa conferencia «La vida con un bajo número de Reynolds». Algunas bacterias deben luchar contra valores de aproximadamente 10^{-5}. Para ilustrar esta situación, Purcell comparaba el nadador microbiano con una persona sumergida en una piscina llena de melaza. En tales circunstancias, el número de Reynolds para un hombre adulto cae hasta 130, más o menos.

Para acabar de estropearlo, una persona sumergida en la melaza no iría a ningún lado con las brazadas simétricas que lo impulsan en el agua. Cada brazada repetitiva solo conseguiría deshacer lo que se consiguió previamente. Tirar del brazo hacia sí mismo apartaría la melaza de su cabeza, pero extenderlo de nuevo hacia arriba para repetir la brazada volvería a empujar la melaza a donde estaba antes. El nadador se quedaría en el sitio, como un insecto atrapado en la savia de un árbol. Del mismo modo, las bacterias y otros microbios no pueden emplear movimientos alternativos para desplazarse por ningún fluido, sea agua, del mar o de una charca, o los jugos que se agitan en el tubo digestivo, así que han desarrollado otras maneras completamente diferentes de nadar.

Las dos soluciones más comunes mediante las que los microorganismos resuelven los problemas que imponen los bajos números de Reynolds son los cilios y los flagelos. Los cilios, protuberancias cortas con aspecto de pelo, recubren las superficies de los paramecios, y otros protozoos monocelulares, que son distintos de las bacterias. Para moverse, los paramecios baten sus cilios sin parar, a modo de remos en miniatura, aunque con un estilo peculiar: durante la palada impulsora, los cilios están totalmente extendidos, lo cual crea mucho arrastre. En la palada recuperadora, por el contrario, se flexionan y rizan en una forma que recuerda a pequeños signos de interrogación, de modo que sufren mucho menos rozamiento. Debido a esta diferencia de fricción, la palada impulsora empuja al microor-

Las formas de vida microscópicas no es que naden, es que empujan y tiran, se crispan y salen disparadas, rotan y actúan como sacacorchos para abrirse camino a través de fluidos y por superficies viscosas

ganismo hacia delante más de lo que la recuperadora tira para atrás de él, y así consigue nadar.

Muchas especies de bacterias, como la tan estudiada *Escherichia coli*, se impulsan con filamentos proteínicos helicoidales similares a un látigo, los flagelos. Se asemejan a cilios largos, pero se comportan de manera muy diferente. En lugar de remar, el flagelo de una bacteria rota: impulsa por el fluido a la célula a la que está vinculado de manera parecida a como un sacacorchos penetra en el corcho. Cuando el flagelo gira en sentido contrario a las manecillas del reloj, la bacteria se mueve hacia delante en línea recta; un cambio repentino de sentido de giro provoca que el microbio se contorsione y cambie de dirección.

En un mundo de bajo número de Reynolds, la inercia apenas si cuenta. Mientras que una persona que nada de espaldas puede dar algunas brazadas, cesar de impulsarse y aun así seguir deslizándose durante un trecho, algunos microorganismos deben moverse sin pausa si quieren desplazarse. Si una bacteria dejase de agitar sus flagelos, quedaría completamente parada al cabo de una distancia menor que la décima parte del diámetro de un átomo de hidrógeno, según los cálculos de Howard Berg, de la Universidad Harvard, uno de los pioneros de la investigación del movimiento bacteriano.

MISTERIOS MICROBIANOS

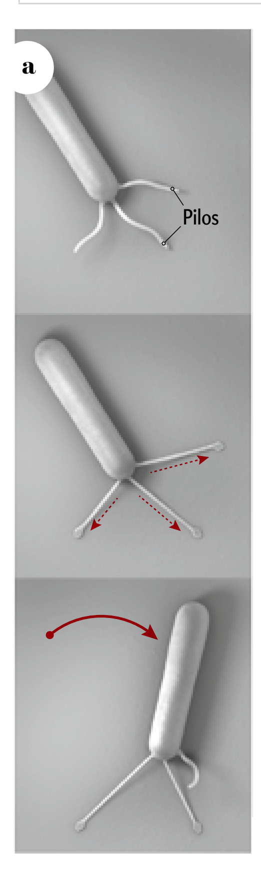
Mucho se ha aprendido desde los años setenta sobre los microbios que se sirven de cilios y flagelos. Otros organismos, sin embargo, no eran tan fáciles de comprender: se movían sin usar ni cilios ni flagelos, ni ningún otro medio manifiesto de propulsión. En los últimos diez años, por fin se han empezado a dilucidar algunos de esos misterios de la locomoción microbiana, a menudo con la ayuda de útiles de observación con una gran capacidad de discriminar detalles y de los que antes no se disponía. «Los últimos decenios nos han dejado un descubrimiento sorprendente tras otro sobre las diferentes maneras que tienen las bacterias de apañárselas», comenta Mark McBride, de la Universidad de Wisconsin-Milwaukee. Algunos de los hallazgos más sorprendentes son los que se refieren a unas bacterias muy abundantes que nadan pero no poseen flagelos.

Las bacterias de forma helicoidal del género *Spiroplasma* nadan en los jugos de las plantas e insectos a los que infectan a pesar de que no tienen apéndices natatorios de ninguna clase. Joshua W. Shaevitz (ahora en la Universidad de Princeton) y sus colaboradores piensan que estos organismos han desarrollado una curiosa manera de moverse. Unas cintas proteínicas en forma de espiral presentes en su interior les confieren un sostén estructural. En 2005, Shaevitz las examinó de cerca con sus colaboradores mediante una elaborada técnica microscópica que separa y vuelve a enfocar la luz polarizada para mejorar el contraste y los detalles de la imagen. Sus observaciones revelaron que unos diminutos motores proteínicos retuercen un segmento de las cintas en una dirección y otro segmento en dirección contraria, y crean así un doblez de 111 grados en el lugar donde se juntan los dos segmentos. Recuerda a cómo se enreda el cable del teléfono. Estos dobleces viajan en ondas con rapidez y de manera continua de un extremo a otro de la célula, y crean codos en el cuerpo mismo de la célula. Estos codos

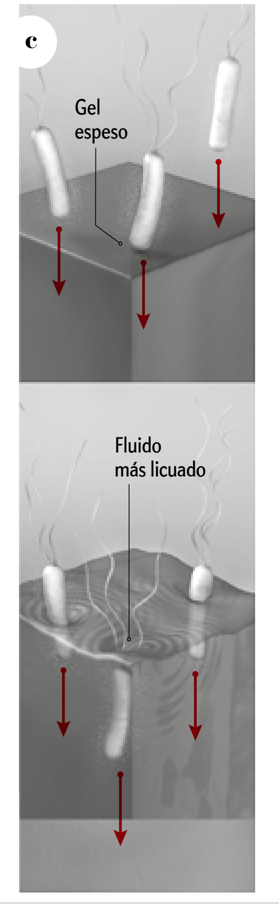
MÁS ALLÁ DE CILIOS Y FLAGELOS

Tres singulares formas de locomoción

La mayoría de los microbios se sirven de apéndices claramente visibles para nadar: los cilios, una especie de pelos que se agitan; y los flagelos, filamentos más largos, que se ondulan o rotan. Otros microorganismos se mueven de maneras mucho más sorprendentes. Para desplazarse por un fluido que recubre una superficie sólida, *Pseudomonas aeruginosa* (*a*) se sujeta primero a la superficie con tres robustas y adherentes cadenas proteínicas llamadas pilos. Luego, suelta de repente uno de ellos y el cuerpo sale disparado. Las bacterias marinas del género *Synechococcus* (*b*), con forma de píldora, se sirven de intrincados motores internos donde unas proteínas redondeadas surcan unas pistas helicoidales y arrugan la superficie de la célula de manera que el microbio avanza rotando. De forma colectiva, los grupos de *H. pylori* (*c*), una bacteria que ha evolucionado hasta colonizar el estómago humano, catalizan una reacción química que por un lado neutraliza el ácido clorhídrico y por otro transforma el moco del estómago, que de ser un gel espeso se convierte en una sustancia más fluida.







EMILY COOPER

empujan contra los fluidos circundantes, de modo que la bacteria avanza.

Synechococcus, un grupo de bacterias marinas fotosintéticas con forma de píldora, sigue desconcertando a los científicos. Como las *Spiroplasma*, se las arreglan para nadar a pesar de que carecen de medio manifiesto alguno para moverse. En 2012, George Oster, de la Universidad de California en Berkeley, y Kurt Ehlers, del Instituto de Investigación del Desierto en Reno, Nevada, propusieron la explicación más verosímil hasta la fecha. Ambos se inspiraron en unas investigaciones recientes sobre *Myxococcus xanthus,* una bacteria del suelo no emparentada con *Synechococcus*. Se sabía que *M. xanthus* a veces se desliza sobre las superficies sin utilizar ningún apéndice externo, pero no se estaba seguro de cómo lo hacía.

En 2011, David Zusman y Beiyan Nan, colegas de Oster en Berkeley, marcaron unas proteínas, de las que sabían que ayudaban a moverse a *M. xanthus,* con unas moléculas fluorescentes que desprenden un color rojo brillante bajo la luz ultravioleta. Con un potente microscopio, observaron las enrojecidas proteínas de diferentes tamaños moviéndose a lo largo de un lazo de fibras proteínicas retorcidas; creaban así bultos en la superficie de la célula que actuaban como la oruga de un tanque. Ehlers y Oster piensan que *Synechococcus* emplea una estrategia similar, pero a un ritmo mucho más rápido. Según su modelo matemático, si existe un motor proteínico análogo dentro de *Synechococcus*, nada en la física impide que gire con rapidez suficiente para impulsar la bacteria por el agua.

Algunas bacterias han desarrollado formas de viajar en el seno de fluidos y geles miles de veces más viscosos que el agua, hazaña que desafía a la razón si consideramos que, con su tamaño, moverse por el agua constituye ya un problema enorme. *Pseudomonas aeruginosa* vive en el suelo, en el agua y en muchos materiales artificiales; también medra en el cuerpo humano, en particular infectando la sangre, los pulmones y el tracto urinario. En 2011, Conrad y su equipo filmaron *P. aeruginosa* moviéndose por un medio viscoso sobre un trozo de vidrio. Emplearon cámaras más rápidas que las de estudios precedentes. Las bacterias extendían y reabsorbían repetidamente sus pilos, unos apéndices adherentes del aspecto de un cabello, y los utilizaban a modo de arpeos para tirar de sí mismas y avanzar, un conocido truco microbiano. Pero la nueva película reveló una sorpresa: *P. aeruginosa* a veces largaba un solo pilo mientras mantenía tensos los demás, y así se catapultaba sobre el vidrio a una velocidad unas 20 veces mayor que la habitual.

Los investigadores piensan que ese salir las bacterias disparadas a tanta velocidad reduce la viscosidad del fluido circundante mediante un proceso conocido como tixotropía. Los fluidos no newtonianos, como la melaza, el kétchup y la clase de sustancias viscosas por los que se mueve con frecuencia *P. aeruginosa*, se vuelven menos viscosos cuando se les somete a una presión. Igual que al agitar un envase de kétchup se fluidifica la salsa que contiene, el retroceso de su propio cuerpo le sirve a *P. aeruginosa* para licuar el espeso fluido que la rodea.

PARA NADAR, las bacterias *Spiroplasma* forman unos codos que se trasladan a lo largo de la célula como una onda (*de arriba abajo en la tira*). Los codos empujan el fluido circundante e impulsan al microbio.

CORTESÍA DE JOSHUA W. SHAEVITZ, UNIVERSIDAD DE PRINCETON

Helicobacter pylori, que tiene forma de espiral, ha desarrollado una manera todavía más impresionante de reducir la viscosidad. Esta bacteria, que ha hecho del estómago humano su hogar y provoca úlceras, se enfrenta a dos grandes dificultades: en primer lugar, debe sobrevivir al caldo cáustico del estómago; y en segundo, debe atravesar una gruesa capa de moco para alcanzar las células epiteliales del estómago, su nicho preferido. Para resolver el primer problema, *H. pylori* segrega la enzima ureasa, que cataliza una reacción química que convierte la urea del estómago en amoníaco y dióxido de carbono, y neutraliza así el ácido clorhídrico. Los biólogos siempre asumieron que *H. pylori* se servía de sus potentes flagelos rotantes para abrirse paso a través del moco. Pero cuando en 2009 Jonathan Celli, ahora en la Universidad de Massachusetts en Boston, y sus colaboradores privaron de urea a *H. pylori* en un experimento de laboratorio, no se podía mover por un sucedáneo del moco. La investigación de Celli da a entender que la misma reacción que neutraliza el ácido en el estómago cambia la conformación de las proteínas en el moco y transforma ese gel casi sólido en un fluido más fácil de surcar.

En torno a nosotros —y dentro de nosotros— criaturas diminutas como *H. pylori* se las ven con tremendas fuerzas físicas que nos pasan inadvertidas. Un vistazo rápido a las bacterias bajo el microscopio, rotando vertiginosamente como tiovivos sin freno o zigzagueando con aparente facilidad, no da fe de su lucha. Para comprender lo que sería vivir y moverse como los microbios, deberíamos sumergirnos nosotros mismos en una extraña realidad alternativa, un mundo donde el agua fuese tan espesa como la melaza. Lo que Martin Clougherty experimentó en 1919 es lo que muchos microorganismos padecen cada segundo de su corta y penosa existencia. Para un microbio, agitar un cilio o contorsionarse para avanzar una fracción de milímetro no es algo trivial, sino una monumental hazaña, un gran ejemplo de la constancia de la evolución a lo largo de eras.

Ferris Jabr *es redactor asociado en* Scientific American.

PARA SABER MÁS

Life in moving fluids: The physical biology of flow. Segunda edición. Steven Vogel. Princeton University Press, 1996.

Dark tide: The great Boston molasses flood of 1919. Stephen Puleo. Beacon Press, 2003.

On the mysterious propulsion of *Synechococcus*. Kurt Ehlers y George Oster en *PLOS ONE* 7(5), e36081, mayo de 2012.

Bacteria use type-iv pili to slingshot on surfaces. Fan Jin, Jacinta C. Conrad et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 108, págs. 12617-12622, agosto de 2011.

CLIMA

Falsas esperanzas

El aumento de la temperatura global podría haberse estabilizado, pero todavía se cierne sobre el planeta una crisis climática

Michael E. Mann

«Las temperaturas han permanecido constantes durante quince años; nadie encuentra una explicación», afirma el *Wall Street Journal*. «La “pausa” en el calentamiento global podría prolongarse veinte años más y la banquisa ártica ha comenzado a recuperarse», sostiene el *Daily Mail*.

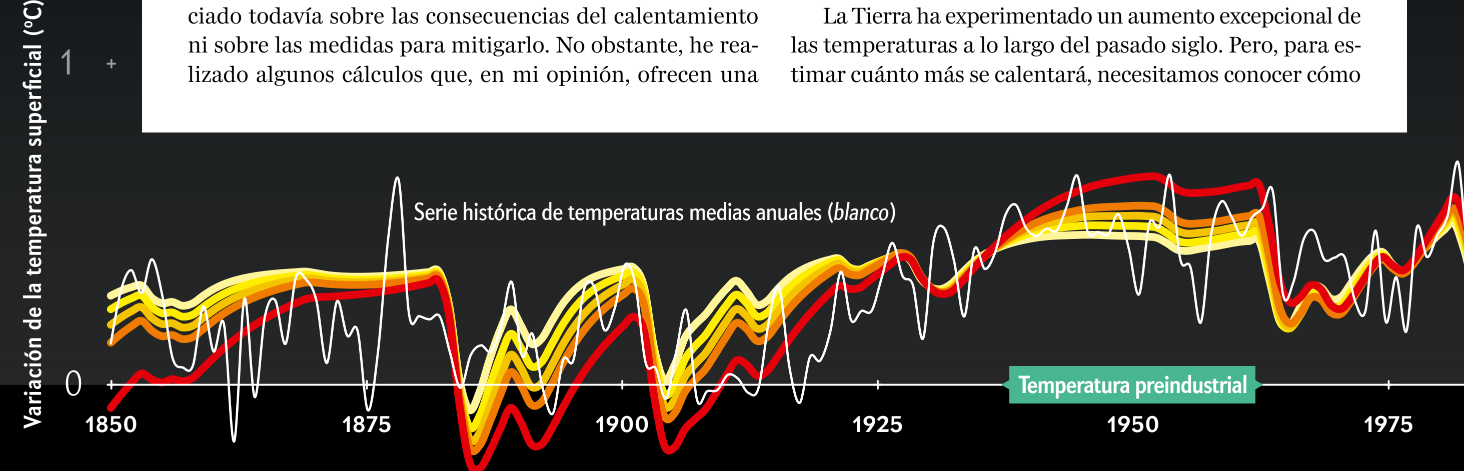
En los medios abundan tales declaraciones. Pero estas son, cuando menos, engañosas: el calentamiento global continúa imparable y sigue constituyendo un problema apremiante. El malentendido se debe a que, según los datos, en la última década se ha ralentizado la velocidad a la que ha aumentado la temperatura media de la superficie terrestre. Con frecuencia se alude al evento como «la pausa», un apelativo muy poco apropiado. Las temperaturas continúan incrementándose; simplemente, no lo han hecho tan rápido como en la pasada década. La pregunta fundamental es: ¿qué grado de calentamiento futuro cabe esperar a partir de dicha desaceleración?

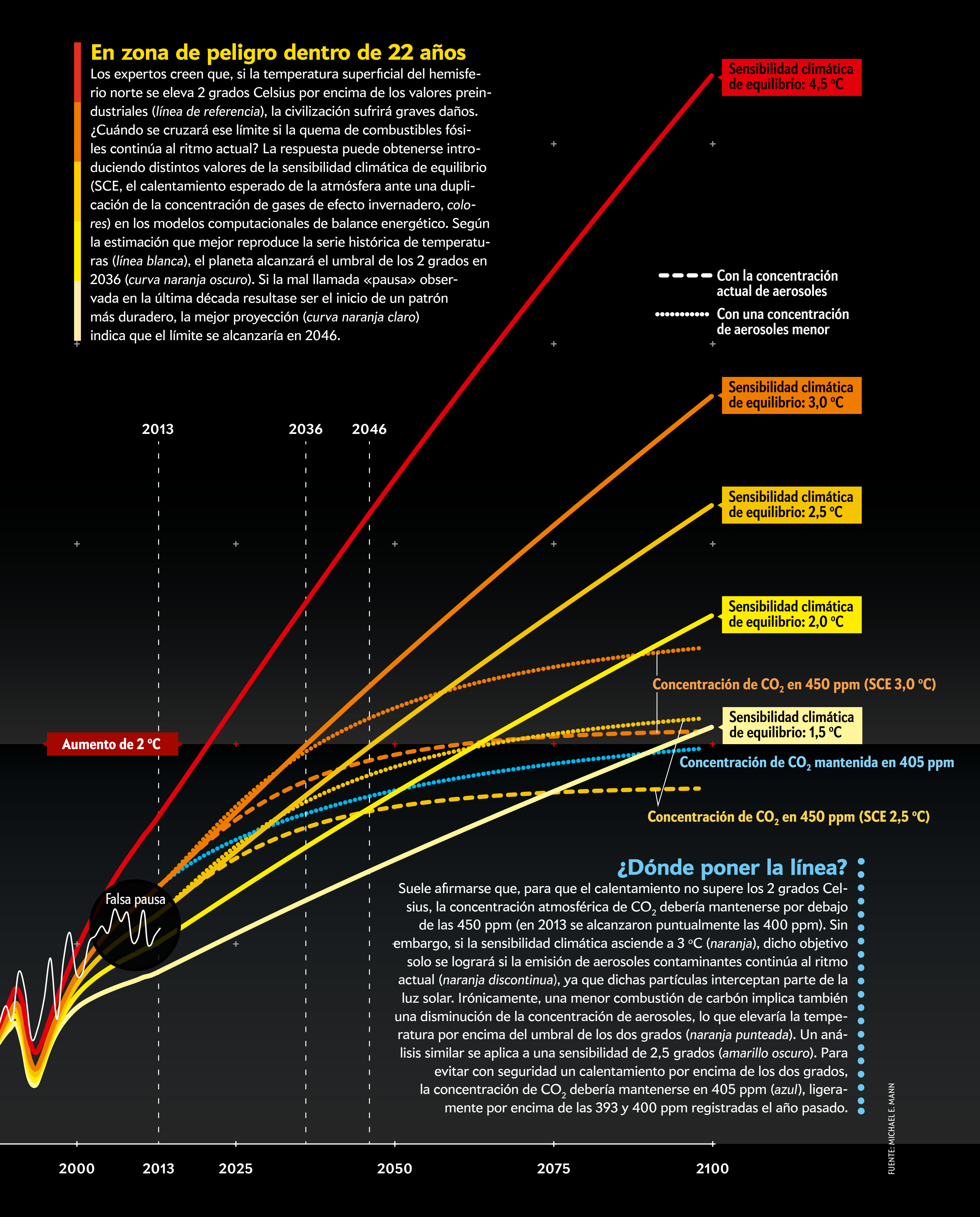
El Grupo Internacional de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) se dedica a estudiar tales cuestiones. En su informe del pasado mes de septiembre, el organismo redujo el valor de uno de los parámetros empleados para predecir el calentamiento futuro. Sus pronósticos, publicados cada cinco o siete años, marcan las directrices de las políticas climáticas a escala internacional, por lo que esa pequeña variación suscitó un debate en torno a la velocidad a la que se calienta el planeta y el tiempo que resta para detener el proceso. El IPCC no se ha pronunciado todavía sobre las consecuencias del calentamiento ni sobre las medidas para mitigarlo. No obstante, he realizado algunos cálculos que, en mi opinión, ofrecen una respuesta: si el hombre continúa quemando combustibles fósiles a la velocidad actual, hacia 2036 se superará un umbral que nos separa de una catástrofe ambiental. La falsa pausa tal vez conceda al planeta unos años más para reducir las emisiones de gases con efecto invernadero y evitar el desastre, pero solo unos pocos.

UN DEBATE PROBLEMÁTICO

El calentamiento global acaparó la atención mundial en 2001, año en que el IPCC publicó un gráfico de mi grupo de investigación, que, más tarde, acabaría conociéndose como «el palo de hockey». El mango del palo, horizontal con una suave pendiente descendente hacia la derecha, indicaba leves variaciones de temperatura en el hemisferio norte a lo largo de casi un milenio. Sin embargo, la curva ascendente de la derecha mostraba un aumento sin precedentes desde mediados del siglo XIX. El gráfico atrajo todas las miradas del debate climático y, muy a mi pesar, me convertí en una figura pública. En el informe de septiembre de 2013, el IPCC prolongó el palo de hockey en el tiempo y llegó a la conclusión de que el calentamiento actual no habría tenido precedentes en al menos 1400 años.

La Tierra ha experimentado un aumento excepcional de las temperaturas a lo largo del pasado siglo. Pero, para estimar cuánto más se calentará, necesitamos conocer cómo




En zona de peligro dentro de 22 años
Los expertos creen que, si la temperatura superficial del hemisferio norte se eleva 2 grados Celsius por encima de los valores preindustriales (*línea de referencia*), la civilización sufrirá graves daños. ¿Cuándo se cruzará ese límite si la quema de combustibles fósiles continúa al ritmo actual? La respuesta puede obtenerse introduciendo distintos valores de la sensibilidad climática de equilibrio (SCE, el calentamiento esperado de la atmósfera ante una duplicación de la concentración de gases de efecto invernadero, *colores*) en los modelos computacionales de balance energético. Según la estimación que mejor reproduce la serie histórica de temperaturas (*línea blanca*), el planeta alcanzará el umbral de los 2 grados en 2036 (*curva naranja oscuro*). Si la mal llamada «pausa» observada en la última década resultase ser el inicio de un patrón más duradero, la mejor proyección (*curva naranja claro*) indica que el límite se alcanzaría en 2046.
Sensibilidad climática de equilibrio: 4,5 °C
Con la concentración actual de aerosoles
Con una concentración de aerosoles menor
Sensibilidad climática de equilibrio: 3,0 °C
Sensibilidad climática de equilibrio: 2,5 °C
Sensibilidad climática de equilibrio: 2,0 °C
Sensibilidad climática de equilibrio: 1,5 °C
2013
2036
2046
Concentración de CO_2 en 450 ppm (SCE 3,0 °C)
Aumento de 2 °C
Concentración de CO_2 mantenida en 405 ppm
Concentración de CO_2 en 450 ppm (SCE 2,5 °C)
Falsa pausa
¿Dónde poner la línea?
Suele afirmarse que, para que el calentamiento no supere los 2 grados Celsius, la concentración atmosférica de CO_2 debería mantenerse por debajo de las 450 ppm (en 2013 se alcanzaron puntualmente las 400 ppm). Sin embargo, si la sensibilidad climática asciende a 3 °C (*naranja*), dicho objetivo solo se logrará si la emisión de aerosoles contaminantes continúa al ritmo actual (*naranja discontinua*), ya que dichas partículas interceptan parte de la luz solar. Irónicamente, una menor combustión de carbón implica también una disminución de la concentración de aerosoles, lo que elevaría la temperatura por encima del umbral de los dos grados (*naranja punteada*). Un análisis similar se aplica a una sensibilidad de 2,5 grados (*amarillo oscuro*). Para evitar con seguridad un calentamiento por encima de los dos grados, la concentración de CO_2 debería mantenerse en 405 ppm (*azul*), ligeramente por encima de las 393 y 400 ppm registradas el año pasado.
2000
2013
2025
2050
2075
2100
FUENTE: MICHAEL E. MANN

reaccionará la temperatura ante el aumento de la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero; principalmente, dióxido de carbono emitido por el ser humano. Dicho parámetro recibe el nombre de «sensibilidad climática de equilibrio» (SCE). Su valor corresponde al calentamiento de la superficie terrestre que provocaría una duplicación de la concentración atmosférica de CO_2 y la subsecuente estabilización del clima; es decir, la llegada a unas nuevas condiciones de equilibrio.

Los valores preindustriales de la concentración de CO_2 se situaban en unas 280 partes por millón (ppm). El doble de dicha cantidad asciende, por tanto, a unas 560 ppm. Los expertos esperan que ese valor se alcance en algún momento del presente siglo si la quema de combustibles fósiles continúa a la velocidad actual. La SCE proporciona una herramienta útil para estimar la magnitud del calentamiento que podemos esperar ante unas condiciones de emisión dadas.

Resulta difícil determinar con exactitud el valor de la SCE, ya que en el calentamiento influyen varios mecanismos de retroalimentación, como la nubosidad, el hielo y otros factores. Los distintos grupos de modelización climática llegan a conclusiones dispares acerca de los efectos precisos de dichos mecanismos. Uno de los principales factores es la nubosidad, la cual puede acarrear un efecto de enfriamiento, al interceptar la llegada de radiación solar, pero también de calentamiento, al absorber parte del calor que, de otro modo, se emitiría hacia el espacio. La preponderancia relativa de ambos efectos depende del tipo, la distribución y la altitud de las nubes, parámetros difíciles de predecir. Otros mecanismos de retroalimentación guardan relación con la cantidad de vapor de agua que podrá retener una atmósfera cada vez más caliente, así como con la rapidez con que se derritan la banquisa oceánica y los casquetes glaciares continentales.

Debido a la incertidumbre inherente a los factores de retroalimentación, el IPCC no publica un único valor de la SCE, sino un intervalo de valores estimados. En su informe de septiembre (el quinto de sus principales informes de evaluación), estableció un abanico que oscilaba entre 1,5 y 4,5 grados Celsius. En el informe precedente, publicado en 2007, el organismo había situado la cota inferior en 2 ºC. Esa rebaja del límite inferior se basaba en un hecho muy concreto: la ralentización del calentamiento superficial observada en la última década. Sí, la falsa pausa.

Un gran número de científicos, entre los que me incluyo, consideran que una sola década constituye un período de tiempo demasiado breve para evaluar los efectos sobre el clima. Además, existen varias explicaciones que dan cuenta del cambio en el ritmo de calentamiento y que, sin embargo, no contradicen las abundantes pruebas que sugieren que las temperaturas continuarán aumentando. Por ejemplo, el efecto acumulado de erupciones volcánicas durante la pasada década, incluida la del volcán islandés de nombre impronunciable, Eyjafjallajökull, podría haber atemperado el clima más de lo que dan a entender la mayoría de las simulaciones. Por otro lado, también se produjo una leve, pero detectable, disminución de la actividad solar, la cual tampoco fue tomada en cuenta por las simulaciones del IPCC.



Michael E. Mann es profesor de meteorología de la Universidad de Pensilvania. Participó en el proyecto del Grupo Internacional de Expertos sobre el Cambio Climático que recibió el premio Nobel de la paz en 2007.

La variabilidad natural de la cantidad de calor absorbido por los océanos también pudo aportar su grano de arena. En la segunda mitad de la década, el fenómeno de La Niña persistió en el Pacífico tropical oriental y central, lo que mantuvo las temperaturas superficiales globales en torno a 0,1 ºC por debajo de la media; un efecto leve comparado con el calentamiento global a largo plazo, pero sustancial en el contexto de una sola década. Por último, un estudio reciente ha revelado que una medición incompleta de las temperaturas del Ártico llevó a subestimar el verdadero grado de calentamiento del planeta.

Ninguna de las explicaciones aludidas implica una menor sensibilidad del clima a los gases de efecto invernadero. Existen otros cálculos que tampoco apoyan la rebaja del límite inferior de la SCE a 1,5 ºC. Combinando todas las pruebas disponibles, el valor más probable se aproxima a los 3 ºC. Y, de hecho, los modelos climáticos empleados por el IPCC en su quinto informe implican un valor aún mayor, de unos 3,2 ºC. En otras palabras, el límite inferior de la SCE establecido por el IPCC probablemente no tenga grandes repercusiones en el clima futuro, del mismo modo que tampoco las tiene la falsa pausa.

Pero, al menos como hipótesis, tomemos la aparente pausa al pie de la letra. ¿Qué ocurriría si el valor real de la SCE resultara ser medio grado menor que el estimado en un principio?

UNA CITA CON EL DESTINO: 2036

Gran parte de la comunidad científica coincide en que un calentamiento de 2 ºC por encima de las temperaturas preindustriales perjudicaría todos los aspectos de la civilización: alimentación, agua, sanidad, territorio, seguridad nacional, energía y prosperidad económica. El valor de la SCE constituye una guía útil para estimar cuándo ocurriría el desastre si continuamos emitiendo CO_2 al ritmo actual.

Hace poco calculé el valor de las posibles temperaturas futuras introduciendo distintos valores de la SCE en un modelo de balance energético. Dichos modelos computacionales determinan la respuesta de la temperatura superficial media ante los factores naturales, como las erupciones volcánicas o la actividad solar, y humanos, como los gases de efecto invernadero, aerosoles contaminantes, etcétera [*véase* «Modelos de balance energético y clima global», por Lourdes Tello; Investigación y Ciencia, octubre de 2013]. A pesar de ser objeto de crítica, los modelos climáticos constituyen nuestra mejor herramienta para describir el funcionamiento del clima a partir de criterios físicos, químicos y biológicos. Además, gozan de una trayectoria probada: hace décadas, los modelos predijeron con acierto el calentamiento observado durante los últimos años.

EN SÍNTESIS

La velocidad a la que ha aumentado la temperatura del planeta se ha ralentizado ligeramente durante la pasada década. No obstante, el calentamiento no se ha detenido por completo.

Los últimos estudios realizados por el autor indican que, si la quema de combustibles fósiles prosigue al ritmo actual, el umbral crítico de los dos grados se alcanzaría en 2036.

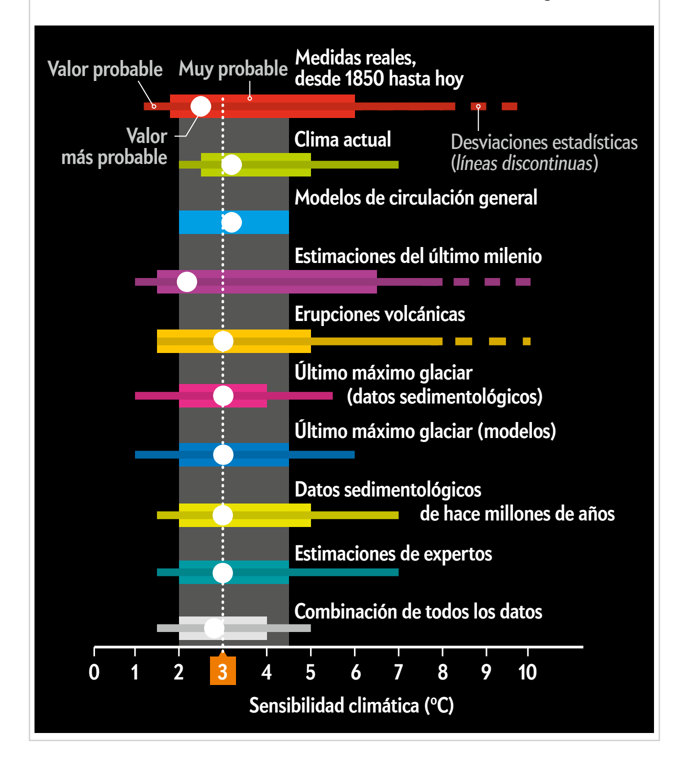
A fin de que las temperaturas no suban por encima de esa cota, considerada peligrosa, las naciones deberían mantener la concentración de CO_2 por debajo de las 405 partes por millón.

PÁGINAS ANTERIORES: PITCH INTERACTIVE

PRONÓSTICOS

Pruebas sólidas

Determinar el momento en que el planeta rebasará el umbral crítico de 2 °C de calentamiento requiere conocer la sensibilidad de la atmósfera ante un aumento de la concentración de CO_2. Un gran número de cálculos independientes de temperaturas pasadas y modelos climáticos (*barras de colores*) revelan que el valor más probable de la sensibilidad climática de equilibrio (*eje horizontal*) asciende a unos 3 °C. La combinación de los distintos estudios se muestra en la barra inferior (*gris*).



A PARTIR DE: «THE EQUILIBRIUM SENSITIVITY OF THE EARTH'S TEMPERATURE TO RADIATION CHANGES». RETO KNUTTI Y GABRIELE C. HEGERL EN *NATURE GEOSCIENCE*, VOL. 1, NOVIEMBRE DE 2008

Asumiendo la tasa actual de emisión de gases de efecto invernadero, hice correr el modelo varias veces para valores de la SCE comprendidos entre el límite inferior considerado por el IPCC (1,5 °C) y el superior (4,5 °C). Las curvas correspondientes a una SCE de 2,5 °C y 3 °C eran las que mejor se ajustaban a los datos instrumentales. Las asociadas a un límite sustancialmente menor o mayor no reproducían en absoluto las mediciones recientes; un hecho que refuerza la idea de que no son realistas.

Para mi sorpresa, obtuve que, para una SCE de 3 °C, nuestro planeta superaría el umbral de calentamiento peligroso en 2036, dentro de 22 años. Si se consideraba el valor de 2,5 °C, el mismo umbral se alcanzaría en 2046, apenas diez años más tarde.

Por tanto, incluso aceptando una SCE menor, nada parece apuntar a que el calentamiento global esté concluyendo ni que se haya tomado un descanso. Tan solo parece habernos concedido un poco más de tiempo —potencialmente valioso— para evitar que nuestro planeta alcance temperaturas demasiado elevadas.

OPTIMISMO PRUDENTE

Una SCE de 3 °C implica que, si pretendemos acotar el calentamiento por debajo de los 2 °C, necesitaremos mantener las concentraciones de CO_2 muy por debajo del doble de los valores preindustriales, hacia las 450 ppm. Pero, irónicamente, si lográsemos reducir de manera notable la quema de carbón, no solo disminuirían las emisiones de CO_2, sino también la concentración de aerosoles que impiden el paso de la radiación solar (como las partículas de sulfato). Por tanto, en realidad deberíamos limitar la concentración de CO_2 a unas 405 ppm.

Por el momento, vamos muy bien encaminados a rebasar dichos límites. En 2013, el CO_2 atmosférico alcanzó por un momento las 400 ppm por primera vez desde que hay datos (y, según el registro geológico, quizá también por primera vez en millones de años). Para no superar el umbral de las 405 ppm, la quema de combustibles fósiles debería cesar de inmediato. Y para evitar el límite de las 450 ppm, las emisiones globales de carbono podrían aumentar solo durante unos años; después, deberían disminuir cierto porcentaje al año. Si la SCE fuese de 2,5 °C, resultaría algo más fácil alcanzar tales objetivos.

Aun así, la conclusión de que una concentración de CO_2 inferior a 450 ppm evitaría un calentamiento superior a dos grados se basa en una definición moderada de la SCE, que solo considera los llamados «factores de retroalimentación rápida», como las variaciones de nubosidad, el vapor de agua y la fusión de la banquisa. Algunos climatólogos, como James E. Hansen, exdirector del Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA, defienden que también deberíamos considerar los mecanismos de retroalimentación lenta, como los cambios producidos en los casquetes glaciares. Hansen y otros investigadores sostienen que, si se toman en cuenta dichos factores, la concentración de CO_2 debería bajar hasta alcanzar los valores de mediados del siglo XX: unas 350 ppm. Ello exigiría poner en marcha un amplio despliegue de técnicas de «captura de aire» para retirar CO_2 de la atmósfera.

Por otro lado, la idea de que un calentamiento de 2 °C supone un límite «seguro» es subjetiva, ya que hace referencia al momento en que la mayor parte del planeta quedará expuesta a las consecuencias de un cambio climático potencialmente irreversible. Sin embargo, algunas regiones ya sufren las consecuencias. En el Ártico, la pérdida de banquisa y la fusión del permafrost están causando estragos en las poblaciones indígenas y en los ecosistemas. En los países situados en islas topográficamente bajas, la tierra y el agua dulce están desapareciendo debido a la elevación del nivel del mar y al aumento de la erosión. Para tales regiones, el calentamiento global actual y el que está por venir debido a la cantidad de CO_2 ya emitida (al menos, 0,5 °C) constituyen ya un cambio climático dañino.

Esperemos que el valor correcto de la SCE resulte moderado y corresponda a 2,5 °C. En tal caso, podremos permitirnos ser algo optimistas y albergar la esperanza de evitar daños irreparables en nuestro planeta. Algo que, por supuesto, solo será posible si asumimos la urgencia de abandonar nuestra dependencia de los combustibles fósiles.

PARA SABER MÁS

Defining dangerous anthropogenic interference. Michael E. Mann en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 106, n.º 11, págs. 4065-4066, 17 de marzo de 2009.

Separating forced from chaotic climate variability over the past millennium. Andrew P. Schurer et al. en *Journal of Climate*, vol. 26, n.º 18, págs. 6954-6973, septiembre de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

La sensibilidad del clima al dióxido de carbono. Antoni Rosell y Andreas Schmittner en *IyC*, diciembre de 2012.

Calentamiento global: ¿más rápido de lo previsto? John Carey en *IyC*, enero de 2013.

Bruno Deiss es docente en la Universidad Johann Wolfgang Goethe y director científico de la Sociedad de Física de Fráncfort.

Allard Mees, arqueólogo del Museo Central Romano-Germánico de Maguncia, es especialista en arqueoastronomía.



ARQUEOASTRONOMÍA

Lunas celtas

La astronomía gozaba de una importancia particular entre los antiguos celtas. Algunas tumbas y lugares de culto revelan el profundo conocimiento que esta cultura milenaria tenía de los complejos ciclos lunares

Allard Mees y Bruno Deiss

«Su principal enseñanza es que las almas no perecen, sino que migran de un cuerpo a otro tras la muerte. Y piensan que esta creencia estimula sobremanera el coraje, pues así se pierde el miedo a la muerte. Discuten además muchas cosas acerca de los astros y sus movimientos, del tamaño del mundo y el de las tierras.» En el sexto libro de los *Comentarios sobre la guerra de las Galias*, su informe para el senado romano, Cayo Julio César no solo habló de cuestiones bélicas y del temible arrojo de los guerreros galos; describió también otros aspectos de la cultura celta tardía, propia de la región que los romanos llamaron Galia. El interés de Julio César por la astronomía celta obedecía también a motivos profesionales: en aquella época desempeñaba el cargo de *pontifex maximus* y, como tal, era el responsable del calendario romano. Desde un punto de vista moderno, sus observaciones sobre la actividad astronómica de los druidas celtas ratifican los apuntes de otros autores romanos y griegos de la Antigüedad.

EN SÍNTESIS

El estudio de los movimientos de la Luna y los cuerpos celestes desempeñó un importante papel en la cultura celta tardía. Sus conocimientos nos han llegado por medio de fuentes romanas y griegas.

Ese interés existía ya en las épocas más tempranas de la civilización celta. Así lo demuestran algunas estructuras funerarias, las cuales se orientaban hacia ciertos puntos fijos de salida de la Luna.

Los arqueoastrónomos han hallado la manera de llevar a cabo tales alineaciones sin necesidad de recurrir a matemáticas complejas: para ello bastaban un tablón y algunos conocimientos astronómicos básicos.



ESTATUA CELTA del siglo VI a.C. encontrada en el túmulo del príncipe de Glauberg, cerca de Fráncfort. El yacimiento ha aportado una de las pruebas más claras sobre los conocimientos astronómicos de esta cultura milenaria.

PAVEL ODVODY/CORTESÍA DEL MUSEO CELTA DE GLAUBERG

Los celtas apenas dejaron documentos escritos. La razón no resulta del todo evidente, ya que durante siglos mantuvieron un intenso intercambio cultural con las culturas letradas del Mediterráneo. El general romano ofrece una posible explicación: «No consideran lícito escribir su doctrina, si bien para casi todas las demás cosas, tanto en los asuntos públicos como en los privados, utilizan el alfabeto griego. No desean que su saber se divulgue entre la gente ni que sus discípulos, confiados en la escritura, descuiden la memoria». En efecto, desde la península ibérica hasta Anatolia, las tribus celtas se sirvieron en ocasiones de los alfabetos griego y latino, sobre todo para textos breves, como leyes o epitafios. Pero, a la vista de los pocos textos que han llegado hasta nosotros, es probable que no se tratase de una práctica muy extendida.

Los custodios del saber eran los druidas, quienes transmitían oralmente sus conocimientos sobre religión y astronomía. Por lo que sabemos, no se trataba de chamanes cortadores de muérdago, sino de miembros de la clase alta formados ex profeso que, aparte de sus funciones religiosas, podían ocupar también cargos políticos.

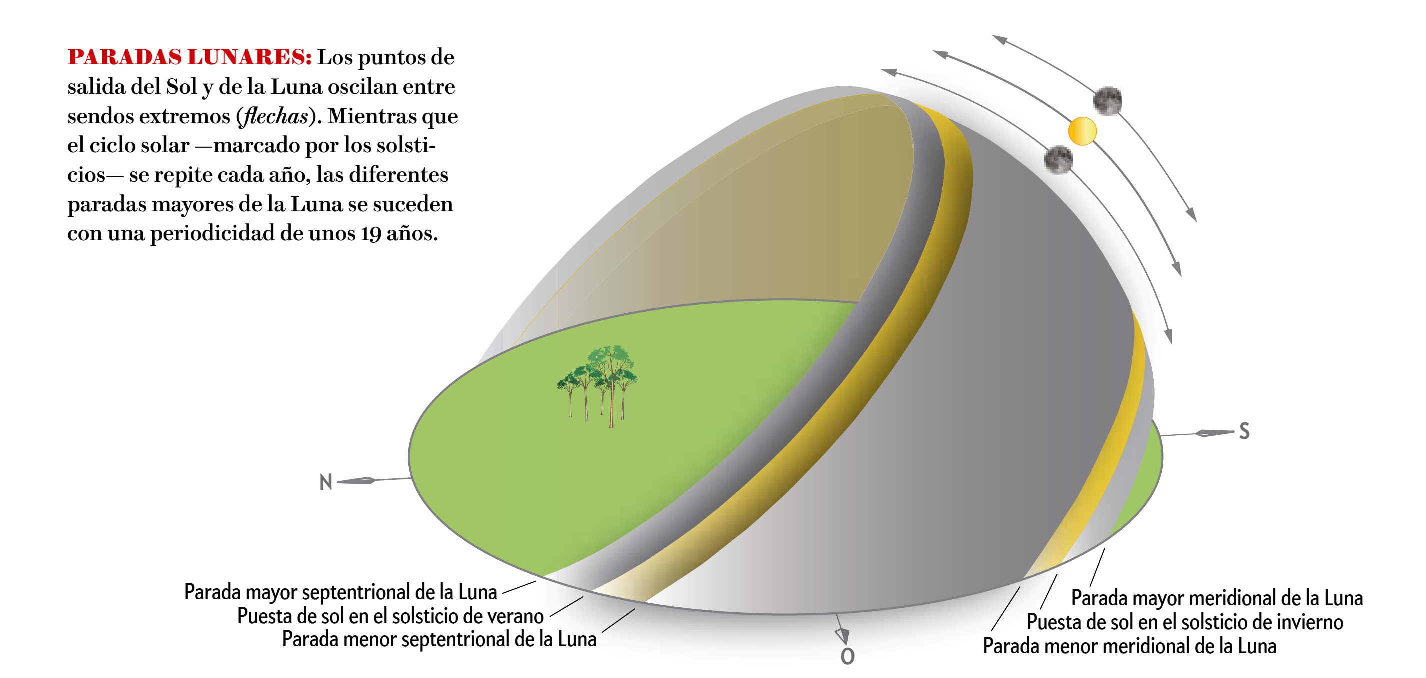
El filósofo griego Posidonio de Apamea, que viajó a zonas celtas en el siglo II a.C., escribió: «Entre ellos prevalece la doctrina de Pitágoras, que defiende la inmortalidad del alma». Sin embargo, la influencia de la escuela griega parece haber ido más allá de la creencia en una vida después de la muerte. «Los celtas honran a los druidas como profetas y videntes, pues se muestran capaces de realizar predicciones a partir de cifras y números mediante la ciencia pitagórica», referiría Hipólito, uno de los padres de la Iglesia cristiana, en el siglo II d.C.

EL CICLO SAGRADO DE LA LUNA

Hoy Pitágoras es recordado como uno de los primeros matemáticos de la historia: no en vano, resulta difícil imaginar la geometría sin su célebre teorema sobre los triángulos rectángulos. No obstante, parece muy probable que el erudito del siglo VI a.C. fuese también el fundador de una cosmovisión religiosa que predicaba la reencarnación y la transmigración de las almas. Según la leyenda, el sabio veía en ello una analogía con los ciclos del cosmos, los cuales se dedicó a investigar en profundidad, acaso sirviéndose de los registros de sacerdotes babilonios.

Puede que la astronomía gozase de una dimensión religiosa también entre los celtas. Diodoro de Sicilia, cronista del siglo I a.C., refirió que celebraban fiestas con una periodicidad

PARADAS LUNARES: Los puntos de salida del Sol y de la Luna oscilan entre sendos extremos (*flechas*). Mientras que el ciclo solar —marcado por los solsticios— se repite cada año, las diferentes paradas mayores de la Luna se suceden con una periodicidad de unos 19 años.



de 19 años, cuando la luna llena alcanzaba su punto más meridional. Debido a la facilidad para observar los ciclos de nuestro satélite, los calendarios lunares eran por entonces muy comunes. Sin embargo, doce meses lunares tienen once días menos que el año solar, lo que obliga a introducir ajustes a largo plazo a fin de evitar que las estaciones se desplacen con respecto a la fecha del calendario.

Para los astrónomos de la Antigüedad, la Tierra ocupaba el centro del cosmos. Por encima, sobre un disco limitado en todas las direcciones por el horizonte, se alzaba la bóveda celeste, en la que día tras día y noche tras noche se desarrollaba un espectáculo maravilloso: el Sol, la Luna, las constelaciones y los planetas salían por el horizonte oriental, se desplazaban por el firmamento y se ocultaban por el occidental. Los eruditos del Renacimiento hallaron la explicación de tales movimientos: la Tierra gira en torno a su propio eje y también alrededor del Sol; pero, dado que el eje de rotación no es perpendicular al plano de la órbita, cada año disfrutamos de meses de verano y de meses de invierno. No obstante, y aunque ignoraban el porqué, los primeros astrónomos dejaron constancia del cómo: mientras que cada estrella y constelación sale, año tras año, por un lugar fijo en el horizonte oriental, los puntos por los que asoman el Sol y la Luna varían en el transcurso de un año o un mes, respectivamente.

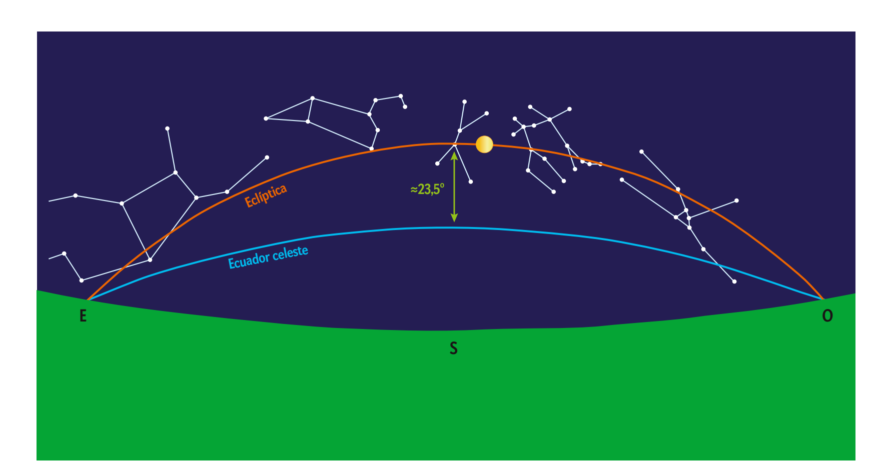
Con todo, un observador atento apreciará en esos movimientos una oscilación regular a lo largo del horizonte. El Sol la realiza en ciclos de un año, entre los solsticios de verano e invierno (cuando alcanza, respectivamente, su máxima o mínima altitud al mediodía). El lugar de salida de la Luna oscila con mayor rapidez, en el plazo aproximado de un mes según el calendario actual. Sin embargo, la ubicación exacta de los dos puntos más extremos varía: dependiendo el año, la Luna puede llegar a salir más al sur o más al norte que el Sol.

Con todo, ese comportamiento aparentemente errático sigue también su propio ritmo con un ciclo que se repite cada 18,61 años. Los momentos en los que la Luna alcanza los puntos extremos de salida entre los cuales la separación es mínima se conocen como paradas menores. Aquellos que se corresponden con su lugar de salida más al norte y más al sur se denominan, respectivamente, parada mayor septentrional y parada mayor meridional. Estas últimas resultan especialmente notorias, ya que, en esos años, la luna llena describe en verano una trayectoria muy plana en el cielo nocturno, en la que parece no elevarse más de un palmo sobre el horizonte. La alusión de Diodoro a



LAS OBSERVACIONES ASTRONÓMICAS de los sacerdotes babilonios eran bien conocidas por los eruditos griegos, quienes probablemente hicieron llegar sus conocimientos a los celtas. La imagen muestra una tablilla de barro del año 687 a.C. relacionada con el movimiento pendular de la Luna alrededor de la eclíptica.

ALLARD MEES Y KATJA HÖLZL (*paradas lunares*); MUSEO BRITÁNICO/INV-NR 36378 (*tablilla*)



UN ASTRÓNOMO CELTA del año 500 a.C. que hubiera observado el cielo nocturno en dirección sur durante la época del solsticio de verano habría visto algo parecido a lo que indica esta figura. Los planetas, el Sol y la Luna avanzan a lo largo de una estrecha franja a través de las constelaciones. La línea superior (eclíptica) indica el curso anual del Sol con respecto al fondo de estrellas fijas. En los seis meses de verano se encuentra por encima del ecuador celeste; en el semestre de invierno, por debajo. Ignoramos qué constelaciones conocían los celtas; las representadas aquí corresponden a las empleadas en la actualidad.

las celebraciones que tenían lugar cada 19 años evidencia que las culturas celtas tardías veían en dicho fenómeno celeste un acontecimiento particular.

PARADAS LUNARES Y TÚMULOS

¿Podemos decir lo mismo de épocas más tempranas, cuando los poblados celtas del centro de Europa se convirtieron en «asentamientos principescos»? Debido a que sobre este período apenas conservamos unas pocas crónicas, breves e incoherentes, las únicas pistas al respecto proceden de las investigaciones arqueológicas.

Hace diez años, a uno de nosotros (Deiss) le llamó la atención la orientación de la «vía procesional» que conduce a la tumba principesca de Glauberg, cerca de Fráncfort. Construida en el siglo IV a.C., consta de dos fosos paralelos, de unos 300 metros de largo, los cuales ascienden en línea recta hasta el sepulcro. Si desde el monumento miramos hacia el horizonte a lo largo de dicha línea, estaremos dirigiendo nuestra vista hacia el lugar más al sur por el que asoma el satélite; es decir, al lugar por el que sale en el momento de la parada mayor meridional.

De idéntico modo se encuentra orientada una estructura emplazada en el asentamiento del monte Lassois, en el curso alto del Sena. En el siglo VI a.C. se excavaron allí varios fosos en forma de un gran rectángulo de unos 24 por 25 metros. En su interior se encontraron restos de dos estatuas de divinidades. Además, la estructura formaba parte de una vasta necrópolis situada cerca del río, razón por la que los investigadores la consideran un santuario. Según estudios realizados por Deiss, varios ejes y la línea de visión desde la entrada apuntan, de nuevo, al punto de salida de la Luna durante la parada mayor meridional.

Un estudio de distintos túmulos realizado por uno de nosotros (Mees) ha demostrado que tales casos no fueron excepcionales. Un ejemplo notable lo hallamos el túmulo de Magdalenenberg, situado cerca de la ciudad de Villingen-Schwenningen, en el sur de Alemania. Con más de 100 metros de diámetro, data de finales del siglo VII antes de nuestra era. En los años setenta del siglo XX, al levantarlo capa por capa, los arqueólogos descubrieron varios postes de madera maciza que, originalmente, habían sido colocados de manera que sobresalieran de la tierra del túmulo. Aunque la documentación acerca la excavación resulta algo imprecisa al respecto, parece que esas hileras de postes se extendían en dirección a los puntos del horizonte correspondientes a las paradas mayores y menores de la Luna.

En el centro del túmulo, en el lugar en el que coincidían esas líneas, habría sido enterrado un príncipe, a juzgar por el abundante y valioso ajuar hallado junto al esqueleto de un hombre. Además, el montículo artificial contenía otras 126 tumbas, labradas entre los años 616 y 593 a.C. según la datación dendrocronológica de los restos de madera. Su orientación supuso una sorpresa: los cuerpos yacían en círculos concéntricos alrededor de la tumba central, pero de manera que, en una de las mitades del montículo, la línea que unía los pies y la cabeza seguía el sentido de las agujas del reloj, mientras que en la otra se orientaba en sentido contrario. De esta manera, la disposición de los cuerpos definía dos semicírculos. Una vez más, la línea divisoria apuntaba al lugar del horizonte correspondiente a la parada menor meridional de la Luna.

Las mismas estructuras geométricas se hallan también documentadas en yacimientos funerarios de menor tamaño. Así,



«LA VÍA PROCESIONAL» de Glauberg (*inserto*) se dirige hacia el punto de salida de la Luna durante la parada mayor meridional (fotografía tomada en verano de 2006).

ALLARD MEES (*constelaciones*); BRUNO DEISS (*fotografía del horizonte*); VERA RUPP (*panorámica de la vía de Glauberg*)

Arqueoastronomía experimental

¿Cómo podemos estar seguros de que un monumento de miles de años de antigüedad fue concebido para apuntar en una determinada dirección celeste? En casos aislados resulta muy difícil descartar una coincidencia fortuita. Sin embargo, varios hallazgos similares sí se consideran indicativos de una manera de proceder sistemática. En general, los expertos consideran aceptables las desviaciones de un grado.

Cabe preguntarse por las técnicas empleadas para determinar con precisión una dirección celeste con los medios de la época. Cuando lo que estaba en el punto de mira era la salida del Sol (como ocurre en la estructura de zanjas de 7000 años de antigüedad conocida como círculo de Goseck, en Alemania), la tarea no revestía demasiada dificultad, ya que el lugar del amanecer no varía demasiado de un día para otro; además, durante un solsticio permanece fijo durante unos ocho días, lo que facilita su obsevación.

La Luna, sin embargo, debido a su rápido movimiento orbital alrededor de la Tierra, sale cada noche en un punto desplazado varios grados con respecto al de la noche anterior. Su posición más meridional (la parada mayor sur de la Luna) solo se alcanza cada 19 años, aproximadamente, algo que bien puede ocurrir en una noche nublada. Para alinear una estructura como el túmulo de Villingen-Schwenningen con las paradas de la Luna, los expertos estiman que sería necesario documentar diez de estos grandes ciclos; esto es, casi dos siglos de observaciones.

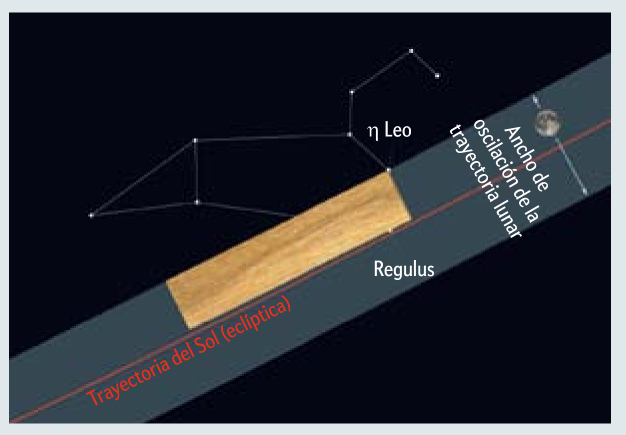
¿Qué ardides pudieron haber permitido ejecutar esa tarea en un período de tiempo más corto? En su punto más meridional, la salida de la Luna tiene lugar un poco más al sur de un punto más fácil de determinar: el del amanecer durante el solsticio de invierno. Si se hubieran determinado ambas salidas en algún lugar del mundo celta, habría sido fácil proyectar la distancia entre ellas en el cielo nocturno y encontrar dos estrellas con idéntica separación. Después, esos conocimientos podrían volver a aplicarse en otros lugares, aunque con cierto error debido a los cambios en la latitud. Si, por ejemplo, quienes planificaron la vía procesional de Glauberg hubieran empleado observaciones tomadas en el sur de Francia, el punto del horizonte determinado por ellos se hallaría desplazado unos tres grados hacia el norte. Sin embargo, dado que el error observado resulta inferior a un grado, parece que las posiciones fueron determinadas in situ (en caso de que recurriesen a este método).

Más exigente en cuanto a los conocimientos astronómicos requeridos, pero igualmente sencillo en su ejecución, habría sido basarse en la eclíptica: la línea que, según se ve desde la Tierra, recorre el Sol sobre el fondo de estrellas fijas. Con respecto a ella, la Luna brilla a veces por encima y en ocasiones por debajo. Ese movimiento pendular se conoce desde el siglo VII a.C., tal y como atestigua una lista registrada en una tablilla de barro asiria. En ella se anotaron las estrellas que alcanzaba la Luna y que, por tanto, marcaban el ancho de la zona de oscilación.

Dicho movimiento pendular determina la distancia entre los puntos del horizonte correspondientes a la parada de la Luna y el solsticio. Así, durante el solsticio de invierno, un astrónomo celta que dispusiera de los conocimientos adecuados habría estado en condiciones de encontrar también la parada mayor de la Luna. La eclíptica se encuentra cerca de Regulus, la estrella más brillante de la constelación del León. Por su parte, la estrella Eta Leonis marca el ancho de la zona de oscilación. Una vez conocida esa distancia, se fabrica un tablón con la anchura correspondiente. Por último, para determinar el punto de salida de la Luna durante la parada mayor meridional, basta con localizar el lugar por el que asoma el Sol durante el solsticio de invierno. Después de varios solsticios sería posible fijarlo con gran precisión, aun sin telescopios ni sistemas de medición de ángulos.

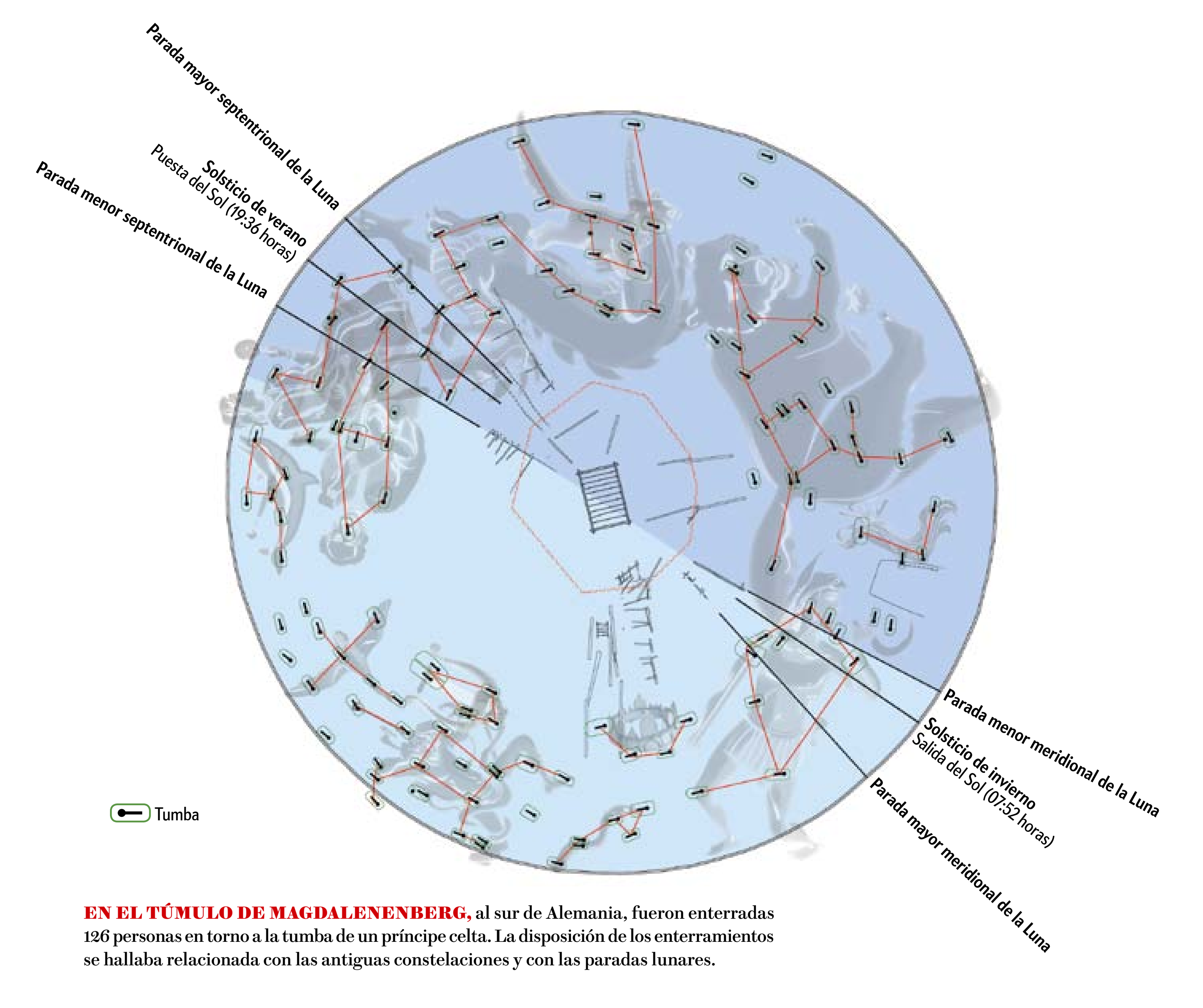


Una técnica sencilla para determinar el punto de salida de la Luna durante la parada mayor meridional: con un tablón de las dimensiones adecuadas (determinadas por las oscilaciones de la Luna con respecto a la eclíptica, *derecha*) se localizan el lugar del amanecer durante el solsticio de invierno y la posición del Sol en el curso de su elevación. El punto buscado se encuentra allí donde la esquina inferior toca el horizonte.



Zona de desviación de la órbita lunar (*gris*) con respecto a la eclíptica. La distancia entre las estrellas Regulus y Eta Leonis proporciona una medida de la desviación máxima.

BRUNO DEISS, ALLARD MEES Y KATJA HÖLZL



EN EL TÚMULO DE MAGDALENENBERG, al sur de Alemania, fueron enterradas 126 personas en torno a la tumba de un príncipe celta. La disposición de los enterramientos se hallaba relacionada con las antiguas constelaciones y con las paradas lunares.

ALLARD MEES, RECONSTRUIDO A PARTIR DE: «EINIGE ERWÄGUNGEN ZU DEN STANGENSETZUNGEN IM MAGDALENENBERG», R. MEYER-ORLAC EN *ARCHÄOLOGISCHE NACHRICHTEN AUS BADEN*, VOL. 31, PÁGS. 12-21, 1983.

los túmulos de Courtesoult, en la región francesa de Borgoña, y Dattingen, cerca de la cordillera de Kaiserstuhl, al sur de Alemania, apuntan hacia las paradas mayores de la Luna. Por su parte, el de Bressey, también en Borgoña, señala hacia las menores. Del mismo modo, las esquinas de la cámara mortuoria de la famosa tumba del príncipe de Hochdorf, al norte de Stuttgart, también parecen estar orientadas hacia las paradas mayores de la Luna.

Hace unos años, Mees comparó la disposición espacial de las tumbas en el túmulo de Villingen-Schwenningen con el cielo nocturno durante el solsticio de verano de hace 2600 años, el cual puede calcularse con ayuda de programas informáticos. Entonces la luna llena se encontraba en una posición baja, como también referiría Diodoro. Además, las constelaciones (aquellas citadas por los autores de las culturas mediterráneas) habrían quedado representadas en los entierros, si bien no con total precisión: aunque las constelaciones del Dragón y de la Osa Menor habían brillado por entonces casi en el cenit, en la reproducción aparecen desplazadas hacia uno de los bordes. Puede que ello obedeciese a la voluntad de no perturbar la tumba central. En cualquier caso, es probable que tales representaciones no persiguiesen la precisión en un sentido moderno; en su lugar, desempeñarían más bien una función simbólica.

Las investigaciones arqueológicas han demostrado la existencia de un intercambio comercial entre las tribus celtas y las civilizaciones del Mediterráneo. A buen seguro, este se vio acompañado de una importación de ideas. Pero, al mismo tiempo, los autores griegos y romanos nos han aportado algunas pistas sobre las nociones con que los celtas relacionaban las paradas de la Luna. Ptolomeo, por ejemplo, no solo describió los aspectos astronómicos, sino también su significado esotérico. Así, durante las paradas de la Luna, ciertas constelaciones causarían el nacimiento de niños con atrofias, mientras que otras darían lugar a futuros héroes. Julio César y muchos otros han dejado constancia de que los celtas creían en la reencarnación, por lo que hay razones para asumir que, para ellos, las paradas cíclicas de la Luna guardaban algún nexo con aquella visión de la vida y la muerte.

PARA SABER MÁS

Die Kelten und der Mond: Neue Forschungen am Magdalenenberg. A. W. Mees en *Antike Welt*, vol. 6, págs. 47-54, 2012.

Sonnenwenden und Mondwenden. B. Steinrücken. Disponible en **www.sternwarte-recklinghausen.de/data/uploads/dateien/pdf/a01_sm_wenden.pdf**

COMPORTAMIENTO ANIMAL

Un ave ingeniosa



El pollo doméstico es inteligente y consciente del mundo que le rodea, lo que suscita cuestiones espinosas sobre el trato que recibe en las granjas

Carolynn L. Smith y Sarah L. Zielinski



Carolynn L. Smith es investigadora de la Universidad Macquarie en Sídney. Su labor gira en torno a la comunicación y la cognición en animales tan diversos como el calamar gigante y los elefantes. En 2010 recibió un Premio Eureka del Museo Australiano.

Sarah L. Zielinski es escritora científica. Sus trabajos han aparecido en *Science*, *Science News* y *Smithsonian*, entre otras publicaciones.



En el reino animal unos son más astutos que otros. Las aves, en particular, hacen gala de notables habilidades que se creían exclusivas de los humanos. Las urracas se reconocen frente al espejo; los cuervos de Nueva Caledonia aprenden a construir y a usar herramientas de sus mayores, y los loros grises africanos saben contar, clasifican objetos por el color o la forma y aprenden el significado de las palabras. Y una cacatúa sulfúrea llamada *Snowball* baila siguiendo el ritmo.

En cambio, pocas personas creen que los pollos gocen de inteligencia. Pero en los últimos años hemos descubierto que esta ave puede ser ingeniosa e incluso ladina, posee habilidades comunicativas comparables a las de algunos primates y emplea señales complejas para dar a conocer sus intenciones. Y no solo eso: cuando toma decisiones apela a su experiencia y sus conocimientos sobre la situación, resuelve problemas difíciles y siente empatía por los iguales que corren peligro.

Esta nueva visión de la mente del pollo hace pensar que ciertas habilidades cognitivas atribuidas tradicionalmente a los primates podrían ser más comunes de lo que se pensaba. Tales descubrimientos tienen repercusiones éticas por el trato que se les dispensa en las granjas avícolas. Reconocerles esos rasgos obliga a reconsiderar las condiciones que soportan en unos sistemas de producción destinados a obtener tanta carne y huevos como sea posible al menor precio.

POLLOS PARLANCHINES

A los investigadores les ha llevado casi un siglo averiguar qué discurre por el cerebro de los pollos. Los primeros indicios se remontan a los años veinte del siglo xx, cuando el biólogo noruego Thorleif Schjelderup-Ebbe dictaminó que las aves se regían por una «jerarquía del picotazo». Un sistema de dominancia que bautizó así después de comprobar en sus estudios que los pollos dominantes imponían su voluntad a los subordinados de esa guisa siempre que tomaban iniciativas por encima de su rango.

El siguiente avance relevante en el conocimiento de la mente del pollo tardaría varias décadas en llegar, hasta que Nicholas y Elsie Collias, de la Universidad de California en Los Ángeles, clasificaron los cantos de las aves y determinaron que el repertorio del pollo constaba de unos 24 sonidos, muchos específicos de ciertas situaciones. Por ejemplo, cuando un pollo divisa una amenaza en el cielo, como una rapaz hambrienta, se agazapa y emite un «iiii» agudo y quedo. El cacareo que la mayoría de la gente asocia con pollos y gallinas es en realidad la llamada de alarma ante un depredador terrestre. El descubrimiento de alimento desata una serie de emocionados «coc coc coc» en los gallos, sobre todo si una hembra escrutadora anda cerca.

Las primeras observaciones indicaban que en ese cerebro del tamaño de una nuez debían estar sucediendo cosas insospechadas. Las vocalizaciones codificaban información específica que pretendía desencadenar una reacción concreta en los congéneres. Pero vincular esos sonidos y movimientos con su verdadero significado no resultó nada fácil hasta que en los años noventa surgieron las técnicas que permitieron contrastar las hipótesis con el rigor necesario. Por entonces, el difunto Chris Evans, de la Universidad de Macquarie en Sídney, y otros comenzaron a utilizar grabadoras de sonido digitales y televisores de alta definición para estudiar el repertorio vocal del pollo en condiciones controladas. En resumidas cuentas, crearon una realidad virtual rodeando las jaulas de prueba con televisores que les permitían modificar a voluntad los encuentros del pollo (con un compañero, un rival o un depredador) y registrar sus reacciones ante cada situación. Los pollos del experimento podían ver a un halcón cernido sobre sus cabezas, a un zorro correr hacia ellos por el flanco o a un gallo cantando, todos ficticios.

La realidad virtual condujo a una revelación sorprendente: las vocalizaciones y los gestos del pollo transmiten información específica que sus semejantes entienden. Así pues, un ave no

PÁGINAS ANTERIORES: CARLTON DAVIS TRUNK ARCHIVE

EN SÍNTESIS

Cada vez más pruebas indican que el pollo doméstico goza de una inteligencia sorprendente.

Las aves son astutas, maquiavélicas y demuestran empatía. Además, poseen complejas habilidades comunicativas.

Tales rasgos hacen pensar que la inteligencia animal resulta más habitual de lo que se pensaba.

Esta nueva visión de la capacidad cognitiva del pollo tiene implicaciones éticas por el trato que estas aves reciben en las granjas modernas.



LOS POLLOS CRIADOS en las explotaciones avícolas de crianza intensiva, como estas gallinas de una granja de Fleurus, Bélgica, suelen vivir en condiciones de hacinamiento tremendas.

YVES LOGGHE, AP PHOTO

precisa percibir una rapaz con sus propios ojos para comportarse como si la estuviera viendo; le basta con oír la señal de alarma de un compañero. Según los etólogos, las llamadas de los pollos son «funcionalmente referenciales», esto es, se refieren a objetos y acontecimientos concretos, de modo muy similar a las palabras. Es como si el ave creara una imagen mental del objeto al oír la llamada que le incita a reaccionar, ya sea huir ante un depredador o acercarse a una fuente de alimento.

El mundo virtual también reveló que los pollos adaptaban los mensajes a la audiencia del momento. De este modo, el gallo que descubre una amenaza sobre sus cabezas da la voz de alarma si sabe que hay una gallina cerca, pero guarda silencio si por allí merodea un macho rival. Las gallinas son igual de selectivas, pues solo prorrumpen en gritos si tienen polluelos.

En conjunto, tales hallazgos indican que el ave no se limita a reflejar su estado de ánimo en las vocalizaciones, como cuando está asustada o hambrienta, sino que interpreta la trascendencia de los acontecimientos y, lejos de responder por simple reflejo, parece meditar sus acciones. Se diría que piensa antes de actuar, un rasgo más propio de los mamíferos de cerebro desarrollado que las aves.

POR LAS BUENAS O POR LAS MALAS

Las llamadas referenciales demuestran que habíamos subestimado la inteligencia del pollo. Los estudios también han planteado una pregunta intrigante: si pueden transmitir información sobre acontecimientos que tienen lugar en su entorno, ¿podrían ocultar esas noticias o incluso difundir información falsa para obtener provecho de esa conducta engañosa? Las investigaciones sobre otras formas de comunicación en los pollos aportan nuevos datos al respecto.

Desde los años cuarenta se sabe que las aves ejecutan complejas exhibiciones visuales cuando descubren alimento. La más destacada consiste en una serie de movimientos que podrían denominarse «repicoteo», en la que el gallo dominante sacude la cabeza de un lado a otro y arriba y abajo, tomando y dejando caer un bocado con el pico para señalar a las gallinas que ha encontrado algo apetitoso. Tal comportamiento representaría su principal arma de seducción. Por su parte, los investigadores creen que los machos subordinados actúan con discreción para no llamar la atención del gallo alfa, y ciertas observaciones realizadas en el contexto de los grupos sociales apuntan a que la jerarquía del picotazo no resultaría tan estricta como en un principio se pensó. De hecho, cada vez existen más indicios de que los pollos pueden comportarse como unos perfectos canallas.

Con anterioridad no se había identificado esta conducta oculta porque las relaciones entre los miembros de la bandada son breves y con frecuencia reservadas; pollos y gallinas prefieren esconderse en herbazales altos y entre los arbustos. Además, una sola persona no puede observar todas las aves a la vez. Una de las autoras (Smith) encontró la solución para superar estas dificultades y la llamó «El Gran Hermano Pollo».

Smith y sus colaboradores instalaron una red de cámaras de alta definición y micrófonos en los aviarios de la Universidad Macquarie (constituidos por espacios amplios al aire libre, con abundante vegetación y rodeados de redes por los cuatro costa-

dos) con la intención de grabar y estudiar cada movimiento y sonido.

Como era de esperar, el gallo dominante del grupo cantaba para demostrar quién era el señor del lugar, repicoteaba para atraer a las damas y lanzaba la voz de alarma ante los peligros llegados del cielo.

Pero fueron los machos subordinados los que dieron la sorpresa. El equipo de investigación suponía que se mantendrían en un segundo plano para no ser blanco de los picotazos y espolonazos del gallo alfa ante cualquier intento de disputa de su harén. Pero las cámaras y los micrófonos revelaron una historia más turbia. Los machos de rango inferior recurrían a tácticas subrepticias inéditas en las aves. Reproducían solo la parte visual del repicoteo (los movimientos de la cabeza sin sonido alguno), con lo que creaban una nueva señal que les servía para atraer sigilosamente a una hembra y burlar la vigilancia del gallo dominante.

El hecho de que los machos subalternos modificasen la señal de repicoteo para seducir furtivamente a las gallinas demostraba una flexibilidad en la conducta que dejó perplejos a los investigadores. Y todavía quedaba por desvelar otras artimañas de estas aves.

Con el propósito de examinar más a fondo el comportamiento de pollos y gallinas, se armaron con más medios técnicos. Sucedía que las vocalizaciones resultaban a veces tan sutiles y tenues que el despliegue de cámaras y micrófonos no bastaba para captarlas. Además de todos los cantos y reclamos emitidos, era preciso registrar la reacción de los demás moradores del aviario.

La mejor solución consistía en adosar a los pollos pequeñas mochilas con micrófonos inalámbricos, similares a los utilizados por los reporteros en exteriores. Pero ¿dónde podrían conseguir el material adecuado para fabricarlos? Smith pensó que unos sujetadores podrían servir. Así que comenzó a reunir sujetadores usados con broches de cierre fácil, preferiblemente negros para que no resaltaran demasiado entre las plumas. Cortó los broches y los tirantes ajustables y fijó a ellos los micrófonos para crear un arnés. Atado a la cintura de las aves el artilugio (apodado Gran Hermano Pollo 2.0) grabaría cuanto dijera y oyese el portador.

A Smith le interesaba estudiar con detalle la respuesta ante el peligro. Los estudios previos que demostraban que a veces los gallos cantan a voz en grito cuando descubren un ave de rapiña, como un halcón, resultaban desconcertantes porque cantar así les exponía a ser blanco de agresores. Se había supuesto que la necesidad de proteger a la pareja y la descendencia resultaba tan crítica para el gallo que lanzar la voz de alarma compensaba el riesgo. Pero Smith se preguntaba si otros factores influían en ese comportamiento.

Y así fue. Con los nuevos dispositivos fue posible escuchar a escondidas hasta las vocalizaciones más quedas y se descubrió que los machos a veces prorrumpían en llamadas por motivos egoístas. Las aves sopesan el peligro para ellas y sus rivales y tienden a cantar cuando el riesgo para sí mismas es menor y pueden poner en un apuro a un rival. El macho canta más a menudo si está cobijado bajo un arbusto y su adversario se halla en campo abierto, más expuesto a los depredadores al acecho. Si la jugada le sale bien, su chica se salvará y el otro pagará las consecuencias.

Esta estrategia se denomina compensación de riesgos y es otra aptitud que los pollos comparten con los humanos. Muchos de nosotros asumimos más riesgo si percibimos un factor atenuante. Los conductores conducen más rápido cuando utilizan el cinturón de seguridad o cuando el automóvil está equipado con frenos antibloqueo. Del mismo modo, los gallos asumen más riesgos cuando se sienten más seguros.

HALLAZGOS

Experimentos con gallos virtuales

El descubrimiento de que los pollos se reconocen unos a otros en la pantalla de un televisor impulsó a Smith y sus colaboradores a crear un gallo animado de tres dimensiones con la misma técnica empleada en películas como *Skyfall* o *Titanic*. Este animal virtual permitió estudiar el significado de las exhibiciones de las aves y la percepción que tienen de sus congéneres. También resolvió la vieja pregunta sobre la función de las barbillas del gallo.

Las barbillas son los colgajos de piel que penden del pico del gallo. Cuando un macho interpreta el repicoteo (la coreografía de movimientos de la cabeza con la que señala a las candidatas que ha encontrado alimento), las barbillas se balancean e incluso le abofetean en las mejillas si demuestra demasiado entusiasmo.

Décadas de estudio no habían logrado descubrir ninguna ventaja de las barbillas. Smith sospechaba que hacía más vistoso el repicoteo y dotaba al gallo de mayor poder seductor, pero no podía verificar esta hipótesis cortando el colgajo y observando la reacción de las gallinas. Así que creó un gallo animado que repicoteaba a voluntad ante gallinas de carne y hueso y modificó la flexibilidad y el tamaño de sus barbillas para estudiar la reacción de estas.

Se observó que los apéndices funcionaban como una bandera de alerta para las hembras, ya que hacían más visible el gallo que había hallado alimento. El ornamento puede resultar algo costoso en términos de salud porque las barbillas grandes exigen la secreción de más testosterona, lo que debilita el sistema inmunitario; pero a la larga merece la pena porque es un atractivo irresistible para las hembras.

A veces la inteligencia de los pollos dificulta su estudio. En numerosas ocasiones un ave echaba al traste el experimento respondiendo a una pregunta distinta a la planteada. Como parte de una prueba de repicoteo, Smith creó una instalación en la que una gallina tenía la posibilidad de ver un vídeo de un gallo con alimento. Pero antes debía aguardar tras una puerta que se abría con un motor de control remoto extraído de un coche de juguete. Una de las gallinas, que lucía una cinta naranja con el número 07, por lo que fue bautizada afectuosamente como «007», destacó por causar problemas.

Mientras esperaba a que le abrieran la puerta con el control remoto, 007 perdió la paciencia y comenzó a examinar con atención el mecanismo de apertura, mirándolo por todos lados. Después de un instante, arrancó con suavidad el alambre que controlaba el cerrojo. La puerta se abrió y 007 consiguió lo que quería, estar junto al gallo y su comida. Después de esa primera prueba, nunca tuvo que volver a esperar. Aunque los investigadores cambiaron el mecanismo del cerrojo varias veces, 007 supo resolver siempre el rompecabezas y salir antes de tiempo.

MAMÁ GALLINA

La lista de habilidades cognitivas de los pollos sigue creciendo con cada nuevo hallazgo. Giorgio Vallortigara, de la Universidad de Trento, ha demostrado que los individuos jóvenes pueden distinguir números y usar la geometría. Por ejemplo, si se les muestra un triángulo inacabado pueden reconocer la forma que tendría con todas sus partes. Y una investigación publicada en 2011 por Joanne Edgar, de la Universidad de Bristol, y sus colaboradores reveló un lado más benévolo de estas aves un tanto maquiavélicas; en concreto, su capacidad de empatizar.

En el experimento de Edgar, las gallinas presenciaban cómo sus polluelos recibían un inofensivo soplo de aire que les alborotaba el plumaje. Los pollitos percibían el soplo como una amenaza y manifestaban los signos clásicos del estrés, como el aumento de la frecuencia cardíaca y el descenso de la temperatura ocular. De modo sorprendente, las madres también se alteraban con solo observar la reacción de sus pollitos: mostraban los mismos signos de estrés, pese a no recibir el soplo de aire y ver que los polluelos no corrían un peligro evidente. Las gallinas también llamaron más a su descendencia. Estas observaciones indican que pollos y gallinas pueden adoptar la perspectiva de otras aves, una aptitud solo vista en un selecto elenco de especies como los cuervos, las ardillas y, por supuesto, el hombre.

La flexibilidad y la adaptabilidad del pollo, heredadas del sociable gallo bankiva, podrían contribuir a su perdición

El hecho de que el pollo doméstico, cuyos parientes cercanos no sobresalen por su inteligencia, posea ese pensamiento tan avanzado lleva a reflexionar sobre el origen de la inteligencia. En lugar de tratarse de un rasgo poco frecuente y de difícil aparición en el reino animal, quizá resulte más común de lo que pensamos y surja siempre que concurren las condiciones sociales apropiadas.

El pollo doméstico debió de heredar las destacables aptitudes cognitivas de su antepasado silvestre, el gallo bankiva, que habita en las selvas del sur y el sudeste de Asia. La sociedad ancestral estaba formada por bandadas duraderas y semiestables, constituidas por entre cuatro y trece individuos de diversas edades. Un macho y una hembra dominantes dirigían cada grupo y, como en tantas otras sociedades, obtenían lo que deseaban, ya fuera alimento, espacio o el apareamiento, manteniendo a raya a sus subordinados. Los machos dedicaban gran parte del tiempo a exhibir sus galas ante las hembras y proporcionarles sustento. Estas observaban con atención a los machos, juzgaban sus acciones y recordaban lo que cada uno había hecho en el pasado, rechazando a los falsos o los desagradables. La reputación del gallo resultaba importante para asegurar a la larga el éxito con las gallinas y la competición por ellas era feroz.

La competencia en la bandada no representaba el único factor que estimulaba la capacidad mental de las aves. Debían afrontar diversas amenazas externas encarnadas en depredadores como zorros y rapaces, cada una de las cuales exigía una estrategia de huida distinta. Estas condiciones les obligaron a idear tácticas inteligentes para lidiar con sus congéneres y con los peligros del entorno, así como maneras de comunicarse en tales circunstancias. Tales características perduran en el pollo doméstico.

Que esa larga lista de habilidades corresponda a miles de millones de animales devorados por los humanos pone sobre la mesa la cuestión del trato que reciben. Aves que en libertad solían vivir en pequeñas bandadas son ahora alojadas en compañía de hasta 50.000 congéneres. La esperanza de vida de diez años se acorta hasta seis meses escasos en los pollos para carne; son sacrificados a esta tierna edad porque han sido genéticamente seleccionados para crecer con tanta rapidez que si se les dejase vivir más sufrirían cardiopatías, osteoporosis y fracturas óseas. El destino de las gallinas ponedoras no es mucho más halagüeño: viven dieciocho meses recluidas en el espacio de un folio de papel.

La flexibilidad y la adaptabilidad del pollo, heredadas del sociable gallo bankiva, podrían contribuir a su perdición, porque le permiten sobrevivir incluso en las condiciones antinaturales y estresantes en que son criados por los humanos. Este tipo de crianza probablemente no cesará mientras a la mayoría de la gente no le importe la procedencia de los alimentos y desconozca la notable naturaleza de esta ave.

Por suerte, los consumidores han comenzado a reaccionar ante semejante situación. En Europa y en algunos estados de EE.UU., como California, se han aprobado nuevas leyes que exigen la mejora de las condiciones de alojamiento de las gallinas ponedoras, impulsadas en buena medida por la demanda de un mejor bienestar para los animales y de alimentos humanos más saludables. En Australia, los avicultores han empezado a proclamar el buen entorno en el que crían las aves de granja para competir por la creciente población de consumidores éticos. Pero todavía resta mucho por hacer. Las condiciones de crianza de los pollos de engorde no se han revisado debidamente.

La verdadera naturaleza de la inteligencia de los pollos apenas ha comenzado a desvelarse, pero una cuestión está clara: distan mucho de ser las aves bobas que antaño se pensaba.

PARA SABER MÁS

Tactical multimodal signalling in birds: Facultative variation in signal modality reveals sensitivity to social costs. Carolynn L. Smith, Alan Taylor y Christopher S. Evans en *Animal Behavior*, vol. 82, n.º 3, págs. 521–527, septiembre de 2011.
The chicken challenge: What contemporary studies of fowl mean for science and ethics. Carolynn L. Smith y Jane Johnson en *Between the Species*, vol. 15, n.º 1, págs. 75–102, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Aves habladoras. Ch. Scholtyssek en *MyC* n.º 17, 2006.
La inteligencia de los cuervos. Bernd Heinrich y Thomas Bugnyar en *IyC*, junio de 2007.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik



Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.

Las palomitas, material de embalaje

El maíz inflado se asemeja mucho al poliestireno expandido con el que se protegen los paquetes frágiles. Posee, además, la ventaja de ser comestible

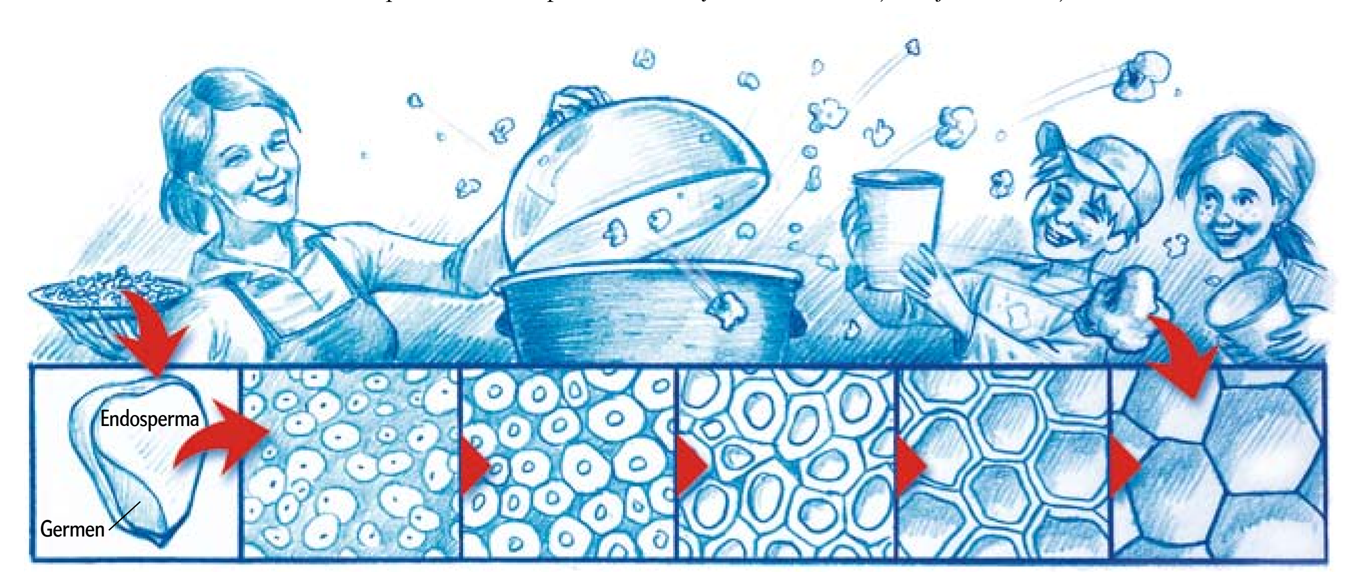
Arroje un puñado de granos de maíz a una cacerola de aceite caliente a fuego vivo algunos minutos... ¡ya está! Nada más fácil que esta receta del maíz suflé, más conocido con el nombre de palomitas. Sin embargo, el resultado es excepcional: una espuma sólida cuyas cualidades no son solo nutritivas y gustativas, sino también mecánicas. El maíz suflé resiste a la presión y amortigua los choques tan bien como el poliestireno expandido, cuya elaboración requiere unas instalaciones industriales perfeccionadas. ¿Cómo una simple cocción de algunos granos puede desembocar en el mismo resultado?

El principio de fabricación del poliestireno expandido es relativamente sencillo. Se trata de un polímero compuesto de largas cadenas de moléculas de estireno. Al añadirle un hidrocarburo que se evapore a baja temperatura, tal como el pentano, se obtiene un granulado sólido de poliestireno expansible. Esos gránulos se transforman, por simple calentamiento, en polímero expandido: cuando la temperatura sube, el poliestireno se hace pastoso y el pentano se vaporiza. La expansión del vapor hincha la matriz y la deja ligera y porosa una vez que el pentano se escapa: la espuma sólida obtenida es un 50 por ciento menos densa que el agua. De hecho, esta aparente simplicidad de fabricación oculta numerosas etapas intermedias que deben estar perfectamente controladas.

Con las palomitas es mucho más fácil, pues el grano de maíz contiene, de entrada, todos los ingredientes de un material expansible. Su corazón, el endosperma, se compone en su mayoría de almidón, polímero cuyo constituyente básico es la glucosa y cuyas propiedades son próximas a las del poliestireno. Este último, pastoso hacia 120 ºC, funde entre 120 y 150 ºC. El endosperma del maíz se presenta en forma de gránulos de una decena de micrómetros de diámetro. Contienen de 8 a 25 por ciento de agua (en masa), la cual desempeña el papel del pentano.

Un material expansible completo

Generalmente, cuando cocemos granos de maíz obtenemos... ¡granos carbonizados! Las palomitas necesitan una variedad de maíz concreta. Los granos de la variedad mariposa (*butterfly*), más pequeños que los otros, tienen una cáscara más resistente. La organización de sus fibras de celulosa es más densa. Ello supone dos ventajas. Primero, su conductividad térmica



EL ENDOSPERMA DEL GRANO DE MAÍZ contiene innumerables y minúsculos gránulos de almidón. Cada uno de estos contiene una microcavidad, donde, durante el calentamiento, se forma vapor de agua. Al hincharse, esa cavidad expulsa el almidón y hace engordar los gránulos, que se aplastan unos contra otros. Resulta al final una espuma sólida, cuyos poros se hallan separados por paredes de almidón finas pero resistentes.

BRUNO VACARO

es mejor: cuando la cáscara está caliente, transmite más calor al endosperma, cuya temperatura crece más rápida y uniformemente. Además, la cáscara es casi impermeable y posee una resistencia mecánica elevada. Sigue siendo necesario, no obstante, calentarla de manera uniforme, sea empleando aceite, sea con aire caliente.

¿Qué pasa cuando se calienta un grano de maíz mariposa? A 100 ºC, empieza a vaporizarse el agua. Si la cáscara es estanca, el vapor permanece encerrado en su interior y la presión aumenta poco a poco. A nueve atmósferas, se rompe la cáscara y estalla el grano. La temperatura interior es entonces de unos 180 ºC. Así, cada grano se comporta como una pequeña olla a presión de muy buenas prestaciones. Por esta razón, el maíz para palomitas debe conservarse con cuidado; los granos maltratados por los choques, demasiado secos o, al contrario, expuestos a la humedad, ya no estallan, o estallan mal. La experiencia muestra que el contenido óptimo de agua es del 12 al 15 por ciento.



LAS PALOMITAS pueden servir para embalar objetos frágiles, dadas sus buenas cualidades amortiguadoras. Es un embalaje fácil de fabricar y biodegradable, pero de vida útil corta y atacable por la humedad. La industria ha desarrollado soluciones que obvian esos inconvenientes.

Expansión y enfriamiento

Si están presentes todos los ingredientes correctos, ¿por qué, durante el calentamiento del grano, no se dispersan en todas las direcciones los gránulos de almidón, sino que, en vez de ello, dan una materia homogénea? Ello atañe a las propiedades del almidón y a la estructura de los gránulos. Cada uno de estos posee una cavidad microscópica con un diámetro del orden de medio micrómetro, que favorece la aparición de una burbuja de vapor en su centro y que así será el origen de un poro del material expandido. Al iniciarse la evaporación, a 100 ºC, la presión ejercida por el vapor sobre las paredes de la cavidad expulsa al almidón. Los gránulos empiezan a hincharse y acaban estallando sobre los vecinos.

A 150 ºC, el almidón se hace viscoso y los gránulos se pegan unos a otros. Al fin, cuando estalla la cáscara del grano, hacia 180 ºC, la presión retorna violentamente a su valor atmosférico. Entonces, el vapor presente dentro de cada cavidad se dilata fuertemente. Las paredes de almidón, que se ha tornado maleable y correoso, acompañan a esa expansión y, por ello, adelgazan. Las largas moléculas constituyentes del almidón deslizan unas con respecto a otras, pero no se rompen; de ahí que no se desgarren.

La expansión de esa espuma viene acompañada por el enfriamiento del grano causado por la evaporación del agua. Ese enfriamiento es de tal magnitud que podría detener la expansión si no fuera por un segundo mecanismo que lo contrarresta: la solidificación del almidón, que libera almidón y reduce el enfriamiento a la mitad. Al final, el grano de maíz hinchado tiene una temperatura de 135 ºC y un volumen cercano al 30 por ciento del inicial. Comprendemos entonces la importancia del contenido acuoso en este proceso: si es demasiado bajo, la presión dentro del grano no sube lo suficiente para que se rompa la cáscara; si es excesivo, queda demasiada agua en el almidón, que se mantiene pastoso y duro.

Como el poliestireno expandido, las palomitas de maíz son poco densas: 55 centímetros cúbicos por gramo el primero y 45 centímetros cúbicos por gramo las segundas (en su versión comercial). Las cualidades amortiguadoras de ambos materiales son excelentes: el aire atrapado en los poros hace las veces de resorte y las paredes sólidas absorben la energía al deformarse. En este punto, el maíz inflado supera al poliestireno. Cuando se deja caer una masa de 2,6 kilogramos desde 90 centímetros de altura sobre una placa de 6 centímetros de espesor, la masa rebota a una velocidad de 1,45 metros por segundo si la placa es de poliestireno expandido, ¡y a 33 metros por segundo si la placa está hecha de un material a base de palomitas de maíz!

Además, el Servicio de Correos estadounidense no vacila en aconsejar a sus usuarios que empleen maíz inflado como relleno de embalaje para los paquetes frágiles. Incluso en Francia, una empresa comercializa palomitas de embalar obtenidas de maíz de barbecho (no comestible). Las ventajas son evidentes. El producto puede fabricarse in situ con un foco calorífico sencillo, lo que elimina el problema del almacenamiento, y el embalaje es biodegradable. El problema es la sensibilidad a la humedad; hay, pues, que emplearlo de inmediato, o bien protegerlo. Esto es lo que logró hace ya casi diez años una empresa que operaba en la localidad occitana de Agen, Pop-Nat, cuyas palomitas conservaban las propiedades durante más de tres meses. Su producto permitía fabricar cajas de botellas o envoltorios, pero era caro. Apostamos a que el interés de las industrias por la protección del entorno facilitará el desarrollo de esos productos, si el balance ecológico neto (el cultivo del maíz es contaminante) resulta positivo.

BRUNO VACARO

PARA SABER MÁS

Modelling deformation and flow during vapor induced puffing. H. G. Schwartzbert et al. en *Journal of Food Engineering*, vol. 25, n.º 3, págs. 329-372; 1995.

por Alejandro Pérez Carballo



Alejandro Pérez Carballo es profesor de filosofía en la Universidad de Massachusetts en Amherst.

Cómo colorear un grafo infinito

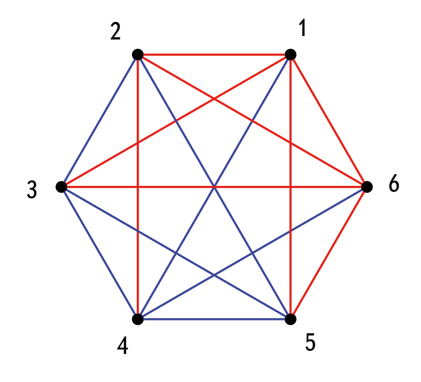
¿Hasta dónde podemos generalizar el teorema de Ramsey?

Dibuje en un papel 4 puntos y conecte cada uno de ellos con todos los demás. Obtendrá un grafo de 4 vértices y 6 aristas. Si hace lo mismo con 6 nodos, el resultado será un grafo con 6 vértices y 15 aristas. En general, al conectar n nodos de tal manera que todos queden unidos con todos, generaremos un grafo G_n de n vértices y $n(n-1)/2$ aristas.

Consideremos ahora el grafo G_6 y procedamos a colorear de rojo o azul cada una de sus aristas. Si intenta hacerlo en casa, le aseguro que encontrará al menos un triángulo monocromático: un conjunto de tres vértices tales que todas las aristas que los conectan están coloreadas de un mismo color. No importa cuánto desorden tratemos de imponer al pintar las aristas de G_6 con dos colores: siempre encontraremos un mínimo de armonía; en este caso, un triángulo monocromático.

Si tomamos G_{18} y repetimos la operación, no solo hallaremos un triángulo monocromático, sino un subgrafo monocromático de cuatro vértices.

El resultado general (una versión del clásico teorema de Ramsey) nos dice que, para todo entero positivo k, existe un número n tal que, si coloreamos todas las aristas de G_n con uno de dos colores, no podremos evitar la aparición de un conjunto monocromático de k elementos [*véase* «Colorear números enteros», por Gabriel Uzquiano; Investigación y Ciencia, enero de 2010].



Grafos y números naturales

Nuestro teorema admite varias generalizaciones interesantes. Podemos, por ejemplo, aumentar el número de colores:

> Para cualesquiera m y k, existe un número n tal que, si coloreamos las aristas de G_n con uno de m colores diferentes, encontraremos un subconjunto monocromático con k elementos.

También podemos complicar las estructuras que coloreamos. Para ello, daremos primero un pequeño rodeo formal.

Si k denota un número natural y A representa un conjunto cualquiera de números naturales, llamaremos $[A]^k$ al conjunto de subconjuntos de A que contienen exactamente k elementos.

Considere ahora el conjunto S_n formado por los n primeros números naturales: $S_n = \{1, 2, ..., n\}$. En esencia, el grafo G_n no es más que una representación de $[S_n]^2$: para verlo, basta con identificar la arista entre los vértices i y j con el conjunto $\{i, j\}$. Así pues, podemos reformular el teorema anterior de la siguiente manera:

> Para cualesquiera m y k, existe un número n tal que, si coloreamos los elementos de $[S_n]^2$ con uno de m colores, encontraremos un subconjunto monocromático con k elementos.

Esto, a su vez, nos sugiere la siguiente generalización:

> Para cualesquiera m, k y j, existe un número n tal que, si coloreamos los elementos de $[S_n]^j$ con uno de m colores, encontraremos un subconjunto monocromático con k elementos.

AL COLOREAR cada arista de un grafo de 6 vértices en el que todos los elementos están conectados con todos, siempre obtendremos un conjunto monocromático con al menos tres elementos. En este caso, los nodos {2, 3, 5} forman un conjunto monocromático.

Existe una generalización adicional de este resultado que ha desempeñado un interesante papel en la historia de la lógica:

> Para todos m, k y j, existe un número n tal que, si coloreamos los elementos de $[S_n]^j$ con uno de m colores, encontraremos un subconjunto monocromático con k elementos, todos los cuales son mayores que k.

Su interés se debe a que, si bien se sabe que dicha generalización es cierta, es sin embargo independiente de los axiomas de Peano. Este resultado se conoce como teorema de Paris-Harrington.

En una próxima columna demostraremos los resultados anteriores empleando un teorema fundamental de la lógica de primer orden, el teorema de compacidad [*véase* «Limitaciones expresivas», por Alejandro Pérez Carballo; Investigación y Ciencia, enero de 2014]. Pero, para ello, formularemos primero una generalización aún más ambiciosa del teorema de Ramsey.

Grafos infinitos

Consideremos el conjunto $[\mathbb{N}]^2$ y pintemos cada uno de sus elementos —a los que seguiremos llamando «aristas»— con uno de dos colores. Como veremos, existe una versión infinita del teorema de Ramsey que nos permite concluir que siempre encontraremos un conjunto monocromático infinito.

Fijemos una asignación de uno de dos colores a cada miembro de $[\mathbb{N}]^2$ y tomemos un entero positivo cualquiera, x_0. Puesto que existe un conjunto infinito de aristas que contienen a x_0, y puesto que a cada una de ellas le ha sido asignado uno de dos colores (rojo o azul), sabemos que, o bien existe un conjunto infinito de aristas rojas que contienen a x_0, o bien existe un conjunto infinito de aristas azules que contienen a x_0. Llamemos c_0 al color (azul o rojo, según el caso) de esas infinitas aristas, y denotemos por X_0 el conjunto

ILUSTRACIONES CORTESÍA DEL AUTOR

infinito formado por todos los números n tales que la arista $\{x_0, n\}$ es de color c_0.

Tomemos ahora un elemento $x_1 \in X_0$. Puesto que hay infinitas aristas de que van de x_1 a un elemento cualquiera de X_0, un número infinito de ellas debe tener el mismo color, al que llamaremos c_1. Sea ahora X_1 el conjunto de todos los números n de X_0 tales que $\{x_1, n\}$ es de color c_1.

Si iteramos este proceso, obtendremos un conjunto infinito, X, formado por los números $x_0, x_1, \ldots, x_n, \ldots$, así como una colección de conjuntos $X_0 \supseteq X_1 \supseteq \ldots \supseteq X_n \supseteq \ldots$ con las siguientes propiedades:

(i) $x_{i+1} \in X_i$, y
(ii) para todo x_i, si $y \in X_j$ con $j \geq i$, entonces $\{x_i, y\}$ es de color c_i.

Ahora bien, debe haber un subconjunto infinito de X, al que llamaremos X^*, tal que para cualesquiera x_i, $x_j \in X^*$, las aristas $\{x_i, x_{i+1}\}$ y $\{x_j, x_{j+1}\}$ sean del mismo color. Dicho de otro modo, existe un color c^* tal que, si $x_i \in X^*$, entonces $c_i = c^*$. Por tanto, X^* es con un conjunto monocromático infinito: nótese que, para dos elementos cualesquiera x_i y x_j de X^* (donde, sin pérdida de generalidad, podemos suponer que $i < j$), la propiedad (ii) implica que la arista $\{x_i, x_j\}$ es de color $c_i = c^*$.

La demostración anterior puede generalizarse para obtener el siguiente resultado:

> Si X es un conjunto numerable y a cada miembro de $[X]^2$ le asignamos uno de entre m colores diferentes, entonces X contiene un subconjunto monocromático infinito.

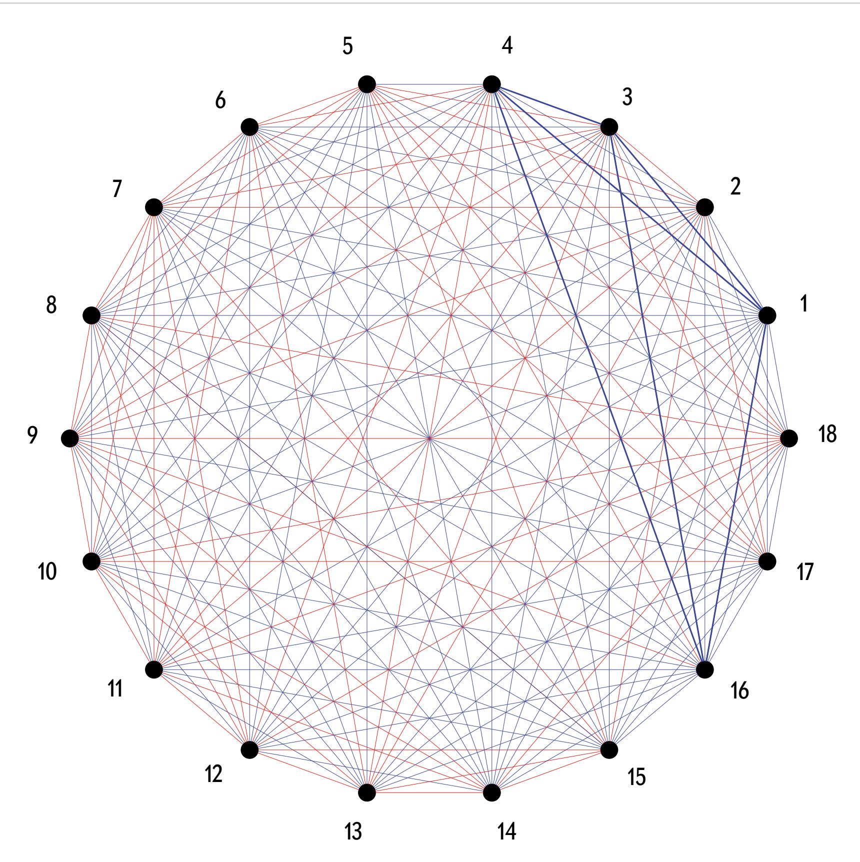
Sin entrar en detalles, podremos ilustrar el razonamiento para el caso de $m = 3$. Supongamos que los colores son rojo, verde y azul, y asignemos uno de esos colores a cada elemento de $[X]^2$. El resultado para el caso de $m = 2$ nos permite concluir que, o bien existe un conjunto monocromático infinito de color azul, o bien existe un conjunto infinito $A \subseteq X$ tal que todos los miembros de $[A]^2$ son de color rojo o verde. (Imagine que es daltónico y que no puede distinguir entre ambos colores: desde su punto de vista, la asignación anterior se vería como una de dos colores.)

Ahora bien, si no existe un conjunto monocromático azul, entonces tendremos un conjunto infinito A tal que a cada miembro de $[A]^2$ es verde o rojo. Por tanto, al aplicar el teorema para el caso $m = 2$, podemos concluir que A contiene un subconjunto monocromático infinito (que, a su vez, será un subconjunto monocromático infinito de X).

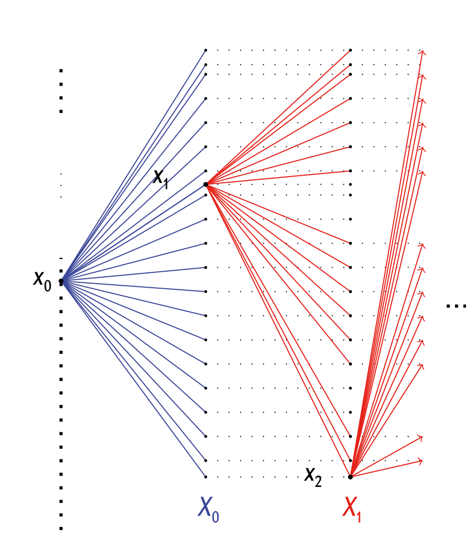
¿Cabe ir más allá? Recordemos que existen conjuntos infinitos que no son numerables; como, por ejemplo, el conjunto de los números reales. Así pues, una generalización muy natural de la versión infinita del teorema de Ramsey sería:

> Si X es un conjunto infinito de tamaño κ y a cada miembro de $[X]^2$ le asignamos uno de dos colores diferentes, entonces X contiene un subconjunto monocromático de tamaño κ.

¿Existen conjuntos de un tamaño mayor que el de los números naturales para los que pueda demostrarse el resultado anterior? Sorprendentemente, la respuesta es *no*. Al menos, si nos restringimos a los axiomas de la teoría de conjuntos clásica.



SI CONSIDERAMOS un grafo con 18 vértices, el menor conjunto monocromático tendrá cuatro elementos. Aquí, {1 , 3 , 4 , 16} forman un subgrafo monocromático.



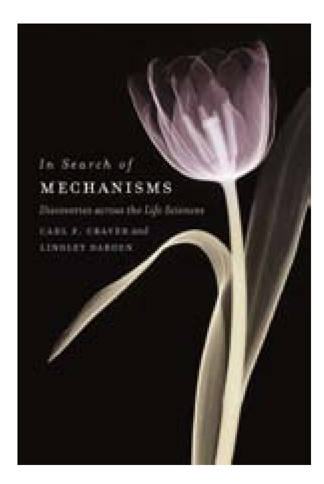
CONSTRUCCIÓN de un conjunto monocromático infinito. Observe que X_1, el conjunto infinito formado por todos los números n tales que la arista que une x_1 y n es de color rojo, forma un subconjunto de X_0, el conjunto infinito de elementos n tales que la arista de x_0 a n es de color azul.

PARA SABER MÁS

Una de las referencias clásicas sobre la teoría de Ramsey es el libro de R. L. Graham, B. L. Rothschild y J. H. Spencer **Ramsey Theory**, John Wiley and Sons, 2.ª edición, noviembre de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Teoría de Ramsey. Ronald L. Graham y Joel H. Spencer en *IyC*, septiembre de 1990.



IN SEARCH OF MECHANISMS. DISCOVERIES ACROSS THE LIFE SCIENCES

Por Carl F. Craver y Lindley Darden. The University of Chicago Press; Chicago, 2013.

Mecanismo

Distinto de la máquina y núcleo de la función biológica

La búsqueda de mecanismos define la trayectoria seguida por la historia reciente de las ciencias de la vida. Sin duda, muchos rasgos de la biología mecanicista se encuentran ya en *Sobre las partes de los animales* de Aristóteles (384-322 a.C.), aunque sería arriesgado llamar mecanicista a Aristóteles. La biología aristotélica ponía el énfasis en las explicaciones finalistas y funcionales, vale decir, en el objetivo que con un órgano o una conducta se perseguía. También se resaltaba la causa formal. Hasta la recuperación medieval del corpus aristotélico, el estudio de la naturaleza cristalizaba en herbarios y bestiarios, con predominio, sobre todo en los segundos, del carácter alegórico. (El castor nos enseña a alejarnos de la tentación del pecado.) Los herbarios, fundados en el color o la figura, revelaban un plan providente para la aplicación de remedios medicinales.

Las correcciones de Andrés Vesalio a la anatomía humana de Galeno y la demostración de la circulación de la sangre por William Harvey entran de plano en el nuevo giro de una búsqueda de mecanismos y creación de métodos experimentales que lo faciliten. En *The New Atlantis*, una obra escrita el 1626 que inspiró la organización social de la ciencia, Francis Bacon describía una sociedad utópica que se sostenía con los esfuerzos de científicos especializados y organizados para descubrir y controlar las causas escondidas de la naturaleza. La revolución científica contemplaba el mundo natural como un mundo de mecanismos; y comenzaron a observar la ciencia como organizada en torno a la búsqueda de mecanismos. En consecuencia, los métodos de la ciencia pasaron a calibrarse en términos de eficiencia y de fiabilidad como herramienta para la búsqueda de mecanismos.

Escrito entre 1629 y 1633, René Descartes dibujó en *Le Monde* un mundo de corpúsculos en incesante colisión. Imaginó innumerables modelos de mecanismos para explicar la diversidad de la naturaleza, viva e inerte. Pensaba en un mundo mecánico de bolas de billar. Todo, salvo la mente humana y Dios, se regía por una actividad fundamental: movimiento conservado a través de las colisiones. La sucesión de colisiones provocaba el movimiento a través del tiempo y desencadenaba la corriente de los ríos, las órbitas planetarias en torno al Sol o la circulación de la sangre. Otros filósofos propusieron nuevos modelos de actividad fundamental, para sacar a la luz los mecanismos. Con un mismo lema común: para explicar los fenómenos de la naturaleza no hay que recurrir a propiedades ocultas ni a fuerzas vivas. Los filósofos mecanicistas del siglo XVI y XVII concedían que la apelación a causas formales y finales cumplieran un papel heurístico en el descubrimiento de mecanismos biológicos, causa última de los fenómenos. Sin embargo, el biólogo mecanicista no interpreta alegorías morales, sino que, a la manera del ingeniero o del técnico, construye un proyecto, un mecanismo que opere en un sistema ideal.

Dos figuras poderosas del siglo XIX en la búsqueda de mecanismos en los organismos fueron Claude Bernard y Emil du Bois-Reymond. Una tendencia que encaja en la cosmovisión de Charles Darwin, en cuyo marco la adaptación exquisita y diversidad de sistemas vivos vienen producidos por un mecanismo de selección natural, un mecanismo carente de finalismo. Los tres resultaron determinantes en el curso de la biología posterior. Pero erraríamos si pensáramos que los biólogos abrazan los modelos mecanicistas clásicos. Para unos, las explicaciones mecanicistas de Descartes terminaron con la introducción de la doctrina newtoniana de las fuerzas y su negación a aceptar la tesis de la acción a distancia. Los mecanismos termodinámicos se agregaron a la lista de actividades en el siglo XIX para explicar la transferencia de energía y tendencia al equilibrio. Las actividades electromagnéticas se establecieron sobre fundamentos sólidos por esas fechas. Diversos tipos de enlaces químicos descubiertos en el siglo XIX y principios del XX componen mecanismos bioquímicos, biomoleculares y metabólicos.

La atención prestada en metaciencia a los mecanismos biológicos es un asunto bastante reciente. De los años setenta del siglo pasado, con aportaciones pioneras de Stuart Kauffmann y Bill Wimsatt. De forma colateral, en los años ochenta Wesley Salmon sistematizó la explicación mecanicista causal en *Scientific explanation and the causal structure of the world*. Salmon abraza una concepción óntica de la explicación y define el concepto de causalidad en términos de procesos e interacciones.

La biología se ha venido centrando con mayor intensidad en los mecanismos a medida que ha ido alejándose de la mera historia natural, descriptiva, y satisfaciendo el triple criterio fundamental de toda ciencia: predicción, explicación y control. La descripción del mecanismo equivale a exponer la naturaleza del fenómeno de interés. Conocer el mecanismo nos permite predecir de qué modo se comportará el fenómeno: si sabemos cómo opera un mecanismo, podemos adelantar su funcionamiento con un cambio de condiciones o de situación. Nos faculta para intervenir en el mecanismo y, con ello, producir, eliminar o modificar el fenómeno de interés. En otras palabras, los mecanismos biológicos nos interesan porque queremos someterlos a control.

En la inquisición sobre un mecanismo hay que empezar por caracterizar el fenómeno, plantearse adecuadamente el problema. La naturaleza del fenómeno aporta claves sobre el tipo de mecanismo subyacente que bien pudiera ser responsable del fenómeno. Habrá luego que construir un esbozo o esquema, un espacio de mecanismos posibles para un fenómeno determinado. Unas veces, los científicos recurren a la analogía para elaborar esquemas de mecanismo plausibles; otras, toman prestado un esquema de un campo vecino; o también, combinan módulos que se saben repetidos en el mundo biológico.

En el camino hacia el descubrimiento del mecanismo, viene luego la evaluación, la separación entre lo bueno y lo malo de un esquema ideado. Y, por último, la revisión, que somete a prueba el esquema privilegiado de mecanismo cuando

se presenta una anomalía empírica. Los mecanismos no son meras correlaciones entre variables, sino entidades y actividades con propiedades espaciales y temporales organizadas para producir, resaltar o mantener el fenómeno.

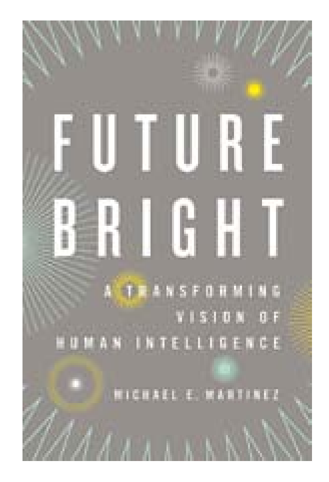
Las entidades tienen tamaño, forma posición y orientación. Las actividades presentan orden, tasa y duración. Las entidades son partes del mecanismo con determinadas propiedades. Las actividades son lo que realizan los mecanismos; son productores de cambios. Una enzima (entidad) fosforila (actividad) una proteína (entidad); la celulasa (entidad) degrada (actividad) las paredes celulares de las plantas (entidad) al descomponer la celulosa en sus componentes glúcidos. Una neurona (entidad) libera (actividad) un neurotransmisor (entidad). El HIV-1 (entidad) infecta (actividad) más de 34 millones de personas (entidad) y causa (actividad) el sida (entidad). Los organismos, las células, las macromoléculas son clases de entidades. Empujar, atraer, difundir, abrir y bloquear son tipos de actividades. Las entidades tienen propiedades, como la estructura y la orientación, que les permiten comprometerse en actividades específicas. Por su parte, las actividades requieren la existencia de entidades con ciertas propiedades específicas. Por ejemplo, la difusión a través de una membrana requiere entidades de tamaño apropiado, diferencias de concentración en cada lado de la membrana y una membrana permeable a iones pertinentes.

Los fisiólogos estudian los mecanismos a pequeña y a gran escala, desde la circulación de la sangre hasta la filtración del agua en los túbulos microscópicos del riñón. Los biólogos moleculares descubrieron los mecanismos básicos de la replicación del ADN y la síntesis de proteínas; continuaron elucidando miríadas de mecanismos de la regulación génica. Y en el camino se ha favorecido la convergencia de campos. Así, la biología molecular y la biología evolutiva constituían disciplinas alejadas entre sí; la primera era mecanicista y centrada en las moléculas; la segunda, teórica y centrada en las poblaciones. Pero ahora ambas convergen en el estudio de los mecanismos moleculares que explican el funcionamiento de los procesos evolutivos, el mecanismo de selección natural y los mecanismos aislantes de especiación. Los neurocientíficos investigan los mecanismos de la memoria espacial, la propagación de los potenciales de acción, la apertura y cierre de los canales iónicos en las membranas neuronales. Los ecólogos abordan los mecanismos de los ciclos de los nutrientes.

Cierto es que, en biología, no se reduce todo a mecanismos; por ejemplo, la labor taxonómica que cataloga la biodiversidad o la epidemiológica que modela la propagación de una enfermedad. Categorización, generalización, modelización, observación y predicción son a menudo útiles en la búsqueda de mecanismos, pero el valor de esas prácticas científicas no se agota con su contribución a la búsqueda de mecanismos. El giro mecanicista adoptado por la biología obedece en buena medida al poder instrumental del conocimiento mecanicista, su fuerza predictiva y capacidad de control.

Los mecanismos biológicos operan a veces como máquinas; así una doble hélice de ADN se abre a la manera de una cremallera y sus bases se mezclan con otras bases que presentan una forma (y carga) complementaria. Pero, muy a menudo, los mecanismos biológicos no se parecen a las máquinas. La máquina es un aparato con piezas preexistentes, organizadas e interconectadas. Señalemos el reloj mecánico, la bomba de agua, el motor de combustión interna o el computador. Los mecanismos biológicos, en cambio, han venido forjándose a través de la evolución por selección natural y del desarrollo; pensemos en el mecanismo de visión y su evolución hasta llegar al ojo humano. La diferencia entre máquinas y mecanismos no es solo un asunto de complejidad y elegancia. Los mecanismos son característicamente activos, constituyen la forma en que las cosas operan cuando operan. Las máquinas existen siempre, actúen o no actúen. Un reloj parado es una máquina, no un mecanismo. Los mecanismos biológicos realizan cosas, cambian cosas, sintetizan cosas, mueven cosas y transmiten cosas. Y, lo que es más importante, una misma máquina puede constar de numerosos mecanismos completamente distintos.

—Luis Alonso



FUTURE BRIGHT. A TRANSFORMING VISION OF HUMAN INTELLIGENCE.

Por Michael E. Martinez. Oxford University Press; Oxford, 2013.

Inteligencia

Cualidad dinámica

La neurociencia cognitiva se propone llegar al problema de la inteligencia a través de la profundización en el conocimiento del cerebro. Se ha venido dando por cierto que la inteligencia constituía un carácter programado genéticamente, inalterable desde el nacimiento. Si lo primero tiene una justificación metodológica, el segundo enunciado carece de base real. Por más que, desde que Alfred Binet inventara el test del cociente intelectual (CI), hace más de cien años, se asentara la idea de una inteligencia prefijada, inmutable como el color de los ojos. Si nuestro CI era de 115 a la edad de 18 años, lo sería a la edad de 32 y a la edad de 72. Es tesis del autor que, lejos de constituir la inteligencia humana una cualidad estática, podemos mejorarla, o degradarla, en el transcurso del tiempo. El CI, la medida común de inteligencia, fluctúa en el curso biográfico de la persona, así como de generación en generación.

La inteligencia, motor de las capacidades humanas, constituye la técnica más poderosa de todas. Para aprovecharla hemos de conocer las expresiones específicas sobre las cuales la mente posee el monopolio; entre otras, la resolución de

problemas y la coordinación que requiere la interacción social. Superamos de lejos a las máquinas, que operan a través de rutinas lógicas. El intelecto confiere sentido a una información compleja y aprovecha esa información para resolver problemas. Así puede detectar patrones y caminos que se les escapan a los computadores más avanzados. En la coordinación de un trabajo que requiera interacción social, la comunicación fluida debe combinarse con el tono emocional de las interacciones. Un trabajo eficaz debe tomar en consideración las miríadas de formas en que las personas difieren (personalidad, intereses, carácter, experiencia, etcétera).

El estudio científico de la mente puede retrotraerse a mediados del siglo xix. En 1869, en la Inglaterra victoriana, Francis Galton, primo de Charles Darwin, publicaba *Hereditary genius*, donde ponía de manifiesto las notables diferencias intelectuales, congénitas en su opinión, entre individuos. Identificó a un millar de genios cuya obra perduraba. Consideraba que la excelencia escaseaba y la cifraba en un individuo cada mil. Había que dilucidar, además, si era una característica aleatoria o se heredaba. Él se inclinaba por la heredabilidad de la eminencia; llegaba incluso a asociar carácteres psicológicos con condiciones genéticas. ¿Por qué no cuantificar la memoria, la comprensión o la resolución de problemas, fenómenos mentales que asociamos a la inteligencia? No fue Galton quien se aprestó a dar ese paso. Lo acometería en el último decenio de la misma centuria Alfred Binet, psicólogo francés.

A Binet se le planteó la dificultad de aprendizaje que mostraban algunos niños. Para distinguir entre aquellos cuyos problemas de aprendizaje se debían a su baja capacidad intelectual y los que, aunque capacitados, fracasaban por abulia, falta de motivación u otras razones, ideó lo que hoy reconocemos como el primer test de inteligencia. La prueba mezclaba rompecabezas, juegos de memoria y cuestiones sobre conocimientos generales. El criterio era sencillo. Si la capacidad intelectual del niño igualaba a la de sus compañeros de la misma edad, entonces su edad mental correspondía a su edad cronológica. La separación entre edad mental y edad cronológica resultó determinante en la construcción de la teoría de la inteligencia. Una etapa ulterior sería calcular la relación entre ambas.

No dio ese paso Binet, sino Wilhelm Stern. La propuesta de Stern sobresalía por su simplicidad: cociente intelectual (CI) = edad mental/edad cronológica × 100. La fórmula adolece de ciertas limitaciones. Por sí misma no nos informa sobre lo que un niño puede conseguir. Cuantifica la inteligencia sin cualificarla. La escala del CI es constitutivamente relativa porque se calcula solo mediante la comparación con otras personas. Hoy, sin embargo, se prefiere computar el cociente intelectual basándose en la curva de Bell, o distribución normal. La curva de Bell ilustra también la variación típica en otras cualidades del hombre. El distanciamiento del promedio se mide mediante la desviación típica o estándar. En promedio, varones y mujeres presentan el mismo cociente intelectual.

Ni Galton ni Binet estaban interesados en medir la inteligencia por sí misma. Sus mediciones se hallaban al servicio de predecir algo que consideraban importante. Galton deseaba poder predecir el estatuto social y suponía que la eminencia en ciencia, arte o liderazgo constituía el pináculo de dicho estatuto. Los esfuerzos de Binet se encaminaron hacia el rendimiento y el éxito escolares. A comienzos del siglo xx, Lewis Terman, de la Universidad Stanford, tradujo al inglés el test de Binet y le añadió nuevas entradas. Adaptó también la fórmula de Stern y se convirtió en el gran divulgador de las pruebas de inteligencia. De hecho, uno de los más extendidos es la escala Stanford-Binet de CI. De la escuela se pasó a la universidad, institución que en ciertos lugares somete a sus candidatos al Test de Aptitud Escolar (SAT, de *Scholastic Aptitude Test*), pergeñado de acuerdo con escalas de CI en forma y concepto. Con un CI de 120 podremos desempeñar un trabajo moderadamente complejo. A esa idea se le llama la hipótesis del umbral.

Algo más tarde, en los años veinte, Catherine Cox acometió una investigación sobre 301 personajes de la civilización occidental, que habían aportado una contribución significativa al campo de la ciencia, el arte, la música, la política y la filosofía, desde el Renacimiento en adelante. Le interesaba averiguar si ya mostraban esa inteligencia privilegiada a una edad temprana. Publicó en 1926 los resultados con la siguiente conclusión general: habían dado pruebas de sus dotes desde la niñez. «A los dos años, Coleridge leía la Biblia; a los cinco, Mozart compuso un minueto; a los ocho, Goethe escribió una obra literaria propia de una persona madura». Puso CI, entre otros, a Jean Jacques Rousseau (125), Nicolás Copérnico (130), Rembrandt Van Rijn (135), Martín Lutero (145), Charles Darwin (140), Abraham Lincoln (140), Leonardo da Vinci (150), Thomas Jefferson (150), Wolfgang Amadeus Mozart (150), Charlotte Bronte (155), Michelangelo Buonarroti (160), Galileo Galilei (165), Samuel Taylor Coleridge (165), Isaac Newton (170), John Stuart Mill (170), Gottfried Wilhelm Leibniz (190) y Wolfgang Goethe (200). Estas cifras, pese a su carácter aproximado, revelaban que los niveles de inteligencia en el rango de 135 a 180 caracterizaban a quienes dejaban huella para la humanidad.

No es lo mismo inteligencia que cociente intelectual. El CI es un valor cuantitativo, abreviado, de inteligencia. Pero no significa que se trate de un resumen cabal de la inteligencia de la persona. Numerosos aspectos de importante información quedan al margen. Por eso la ciencia se plantea si existe una inteligencia única o hemos de hablar con mayor propiedad de gavilla de facultades. Entre los psicólogos reina una división secular. Hacia 1900, Charles Spearman postulaba la tesis de la entidad unitaria, definida por un factor global, o factor *g*. En el polo antagónico, L. L. Thurstone defendía una inteligencia integrada por un haz de posibilidades: memoria, razonamiento matemático y comprensión verbal, entre otras. Conjuntadas, formaban la inteligencia. Otros vieron la solución en la aceptación de ambas posturas. La inteligencia sería, a un tiempo, una y múltiple en un esquema jerárquico.

Resulta patente que la inteligencia humana presenta un abanico amplio de manifestaciones; entre ellas, el autor destaca la inteligencia fluida y la inteligencia cristalizada. La primera nos remite a la capacidad de la mente para adaptarse a un entorno novedoso, complejo y cambiante. Se dice que es inteligente la persona que se desenvuelve bien en situaciones inéditas, tareas novedosas o problemas embarazosos. La inteligencia cristalizada se manifiesta en la capacidad para dominar grandes cuerpos de información. Suele ir asociada a una capacidad verbal. La inteligencia fluida y la cristalizada se complementan entre sí. La inteligencia cristalizada ofrece el conocimiento actual, lo que ya se sabe. Pero si el conocimiento adquirido no basta, el vacío lo ocupa la

inteligencia fluida, la capacidad de abordar lo desconocido.

Podemos acotar la inteligencia fluida de múltiples maneras. Algunos tests de inteligencia fluida emplean formas abstractas, mientras que otros utilizan palabras o números. Todos comparten un rasgo en común: los tests de inteligencia fluida requieren que el sujeto perciba una pauta compleja y la aplique a la solución de un problema. También la novedad es un aspecto que debe considerarse. Importa que el problema o el rompecabezas se le presenten por vez primera al sujeto. Esa exigencia de novedad constituye la nota distintiva de las matrices de Raven, un test clásico de inteligencia fluida. La inteligencia cristalizada constituye el recurso intelectual que corresponde al conocimiento estructural, junto con las habilidades de aprendizaje que facilitan la construcción del conocimiento en el transcurso del tiempo.

Además de las facultades cognoscitivas, la mente humana es poderosa en otras vertientes; por ejemplo, en creatividad, en relaciones sociales (inteligencia social) y en autoconsciencia. En su libro *Frames of mind*, Howard Gardner expuso su teoría de las inteligencias múltiples, que pormenorizaba en siete tipos: lógica-matemática, lingüística, espacial, musical, cinestésica-corporal, interpersonal e intrapersonal. Las inteligencias lógico-matemáticas, verbales y espaciales corresponderían directamente a factores que los psicométricos venían reconociendo hacía décadas. Para Gardner, el pensamiento y la conducta inteligentes eran producto de diversas destrezas, una combinación de lo familiar y lo innovador.

Se insiste hoy también en que las emociones condicionan la forma en que pensamos y el contenido de los conceptos. Ansiedad y frustración pueden obstruir el pensamiento inteligente, en tanto que emociones más positivas, como el interés y la sorpresa, pueden dirigir e incentivar la mente. La ansiedad constituye una de las emociones más estudiadas. Puede, a veces, anular la capacidad raciocinadora de un sujeto. La inteligencia emocional, divulgada por Daniel Goleman a través de *Emotional intelligence*, designa la facultad de percibir y expresar emociones, asimilar la emoción en el pensamiento, comprender y razonar con emociones y regular las emociones en el yo de otros. Se ha cuestionado, sin embargo, que la emocional sea un tipo particular de inteligencia.

En estado embrionario se encuentra la teoría de la inteligencia distribuida. Introducida por Roy Pea, reconoce que toda manifestación de inteligencia humana entraña mucho más que una sola mente que opere de forma aislada. La inteligencia, que operaría siempre a través de recursos definidos por la cultura, vendría a reflejar los conceptos y las prioridades de una cultura local y se desenvolvería con una paleta de instrumentos, técnicas y prácticas. En efecto, hasta las técnicas más elementales pueden servir al pensamiento. La información escrita, recogida en libretas de apuntes o en tratados, pueden compensar la falibilidad predecible de la memoria. Pluma, papel y mente, cuando operan asociadas, son más poderosos que la mente sin auxilio externo. No podemos imaginarnos los logros extraordinarios de Shakespeare, Beethoven y Galileo sin las técnicas disponibles en su tiempo: pluma, piano y telescopio. Los útiles que constituyen la inteligencia distribuida no solo extienden las capacidades de la mente, sino que afectan también a la forma en que esta opera.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

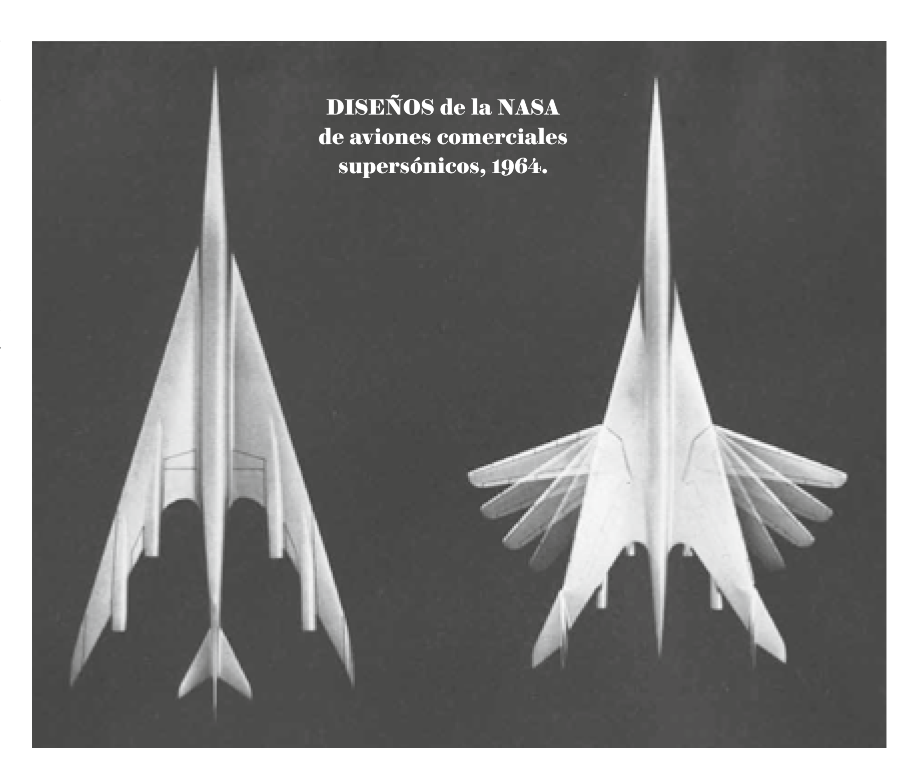


Junio 1964

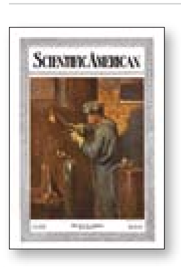
Transporte supersónico

«Casi sin cesar desde los años del *X-1*, los ingenieros aeronáuticos han estado examinando la viabilidad de una aeronave comercial que vuele a mayor velocidad que la del sonido. Tal análisis ha cobrado más actualidad en años recientes a consecuencia del empleo por las líneas aéreas de reactores de transporte subsónicos de alta velocidad. Los estudios plasman la creciente velocidad de crucero en el transporte aéreo. Quienes han estado analizando esa evolución se han venido preguntando si esta llegará a un fin al alcanzarse velocidades próximas a la del sonido. Parece ahora que no hay razones técnicas ni económicas para que la tendencia no prosiga y nos adentremos en el terreno de las velocidades supersónicas [*véase la ilustración*].»

Al cabo de cinco años hicieron sus primeros vuelos el Tupolev Tu-114 *ruso y el* Concorde *francés.*



DISEÑOS de la NASA de aviones comerciales supersónicos, 1964.



Junio 1914

Nota de la Redacción: La noticia del asesinato del archiduque Francisco Fernando, heredero del trono austriaco hace cien años, el día 28 de junio de 1914, no fue cubierta por *Scientific American*. La revista empezó a informar sobre la «Gran Guerra», o I Guerra Mundial, después de que la crisis política europea de julio se agravara y diera lugar al enfrentamiento bélico en agosto.

Pie de tango

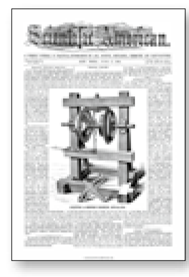
«A dolencias como la rodilla de criada, el codo de minero y otras similares les ha salido ahora un formidable rival: el "pie de tango". En *Medical Record*, el doctor Gustav F. Boehme, hijo, afirma haber sido recientemente consultado por bailarines que se quejaban de "dolor en la parte delantera del pie". En todos los casos, descubrió el mismo síntoma y, después de investigaciones, halló su causa: el baile moderno. El doctor afirma que los bailes de última moda, sobre todo el tango y el maxixe y, en cierta medida, las figuras del vals de la vacilación, demandan una gran flexibilidad al tobillo por lo intrincado de sus distintos pasos.»

¿Skype anticipado?

«Procedente de Alemania acaba de presentarse un ingenioso aparato ideado para transmitir escritos, dibujos y similares a través de líneas telefónicas o telegráficas hasta un instrumento que reproduce perfectamente el original. Los teleautógrafos hace tiempo que se emplean, pero este aparato difiere de los otros en que la escritura en el extremo receptor la realiza un lápiz de luz que recorre una hoja de papel sensibilizado. En pocos segundos, el mensaje es fotográficamente reproducido en la máquina de modo automático.»

Superconductores

«Durante muchos años el laboratorio del doctor Kammerlingh Onnes, en Leyden, ha sido el centro desde el que se han anunciado importantes avances en la investigación sobre la naturaleza de las bajas temperaturas. Últimamente, la atención se ha centrado en la notoria influencia de la temperatura sobre la resistencia eléctrica de los metales. Se ha descubierto que esa resistencia casi se anula en las proximidades de la temperatura del cero absoluto. Y se plantea la pregunta de qué le pasa a una corriente eléctrica una vez iniciada en un circuito de resistencia nula. ¿Seguirá fluyendo de modo indefinido?»



Junio 1864

Investigación en alta mar

«En los sondeos para el tendido de la línea telegráfica transatlántica de Terranova a Irlanda se colocó en el extremo de la sonda un pequeño tubo dotado de una válvula para que recogiera un poco de sedimento del fondo marino. Cuando el material se secó resultó ser un polvo tan fino que, al frotarlo entre los dedos, desaparecía en los surcos de la piel. El microscopio reveló que cada partícula correspondía a un caparazón, la morada de un ser viviente. Si estas estructuras se observan muy ampliadas, se descubren unos orificios por los que sobresalen unos delicados filamentos que constituyen los órganos de locomoción del animal. Cuando esos filamentos se ramifican hacia fuera como las raíces de un árbol, el animal se conoce como rizópodo, palabra compuesta de dos vocablos griegos y que significan "pies de raíz".»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. 210, N.º 6, JUNIO DE 1964

ASTRONOMÍA

Las primeras estrellas

Michael D. Lemonick

Poco tiempo después del fogonazo de la gran explosión, el universo quedó prácticamente a oscuras. Los astrónomos están desvelando el misterio de cómo volvió a iluminarse.





MEDICINA

Desactivar el cáncer

Jedd D. Wolchok

Soltar los frenos que las células tumorales aplican sobre el sistema inmunitario constituye la estrategia de una nueva generación de tratamientos contra esta enfermedad maligna.



OCEANOGRAFÍA

Preocupación por el coral

Iain McCalman

J.E.N. Veron, el descubridor de más del veinte por ciento de las especies de coral del mundo, teme que los problemas de los arrecifes sean mucho más graves de lo que se cree.

PALEONTOLOGÍA

Hallazgo de fósiles con GPS

Robert L. Anemone y Charles W. Emerson

La suerte ha sido fundamental en muchos de los descubrimientos de los fósiles más importantes. Nuevos modelos de información geográfica guían ahora la localización de yacimientos.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza,
Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón,
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado,
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR
IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Seth Fletcher,
Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER,
MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Cardona: *El impacto del canal de Nicaragua*; Joandomènec Ros: *Las zonas áridas, cada vez menos fértiles y La Gran Muralla Verde*; Tomás Ortín: *La supersimetría y la crisis de la física*; Carlos Lorenzo: *El origen de la caza en los humanos*; José M. Vidal Donet: *La revolución del ARN*; Jaume Sastre Juan: *La secreta historia espiritual del cálculo*; Ángel Garcimartín: *Nadar en melaza*; Fabio Teixidó: *Falsas esperanzas*; Javier Grande: *Lunas celtas*; Andrés Martínez: *Un ave ingeniosa y Apuntes*; Juan Pedro Campos: *Apuntes*; J. Vilardell: *Curiosidades de la física y Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España